

Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente

REACTORES BIOLÓGICOS DE MEMBRANAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS ESTUDO PRÉVIO – MBR COMPACTO

Nuno Luís Fradique da Silva Raimundo Tavares

Dissertação apresentada na Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, Perfil Sanitária

Orientador: Professora Doutora Leonor Amaral

Lisboa

2008

Agradecimentos

À Professora Doutora Leonor Amaral por me ter introduzido a este tema, pelo entusiasmo e disponibilidade que sempre demonstrou na forma como orientou este trabalho e ainda pela motivação e confiança que me transmite.

À Professora Doutora Gabriela Almeida pela disponibilidade e interesse demonstrados e pela ajuda que foi imprescindível no entendimento de alguns conceitos.

Ao Engenheiro Bernardo Soares Taneco pela oportunidade de trabalhar em conjunto com a ECODEPUR® – Tecnologias de Protecção Ambiental, pela disponibilidade e interesse que sempre demonstrou e acima de tudo pela confiança que me foi depositada ao longo de todo este processo.

Aos meus Amigos pelo incansável apoio em todas as ocasiões ao longo de todos estes anos e por todos os bons momentos até agora partilhados.

Aos meus Pais e Irmão, por tudo...

Obrigado a **TODOS**

Sumário

O aumento da população mundial, principalmente em zonas de escassez de água, intensifica o aumento da sua procura para usos domésticos, industriais, e agrícolas. A reutilização de águas residuais pode ser apresentada como um contributo alternativo a esta procura, nomeadamente para fins não potáveis, podendo ser tratadas a níveis de qualidade que permitam a sua utilização adequada neste contexto, sendo uma medida, a longo prazo, competitiva do ponto de vista técnico-económico.

Neste âmbito, é efectuado um estudo sobre a aplicabilidade de Bioreactores de Membranas, denominados MBR, no tratamento de águas residuais e sua reutilização, sendo efectuado um estudo prévio para um sistema MBR compacto, dimensionado para 50 habitantes equivalentes tendo-se chegado a um tanque com 11 m³ dividido em duas zonas, uma de equalização com 3 m³ e um reactor biológico com 8 m³. As membranas seleccionadas foram membranas de ultrafiltração PURON® da KOCH, devido ao seu sistema de limpeza inovador e eficiente, assim como às suas garantias de bom funcionamento.

Por último fez-se uma análise com o objectivo de comparar sumariamente em várias vertentes (espaço, funcionalidades, custos, aumento de capacidades, arranque e produção de lamas) um sistema MBR, compacto ou não, com outros sistemas de tratamento.

Esta dissertação tem como principais conclusões, que é possível um sistema MBR compacto ser produzido com um custo capital dentro dos limites comerciais, comparativamente a outras soluções compactas onde, no entanto, a solução MBR é sempre mais dispendiosa em termos de *Total Cost of Ownership* que qualquer outro sistema, apresentando no entanto sempre vantagens em termos da relação qualidade do efluente final e espaço ocupado.

Palavras-chave: mbr, membranas, bioreactor, filtração, microfiltração, ultrafiltração, fouling, fibra oca, lamas activadas.

Abstract

The increase of world population, especially in areas of water scarcity, intensifies the increase in their search for household, industrial and agricultural uses. The wastewater reuse may be presented as an alternative to this demand, in particular for other than potable purposes, being treated to high quality levels allowing their proper use, being in this context a long term technical and economic competitive measure.

In this thesis, it was made a study of the applicability of Membrane Bioreactors (MBR), in the wastewater treatment and reuse, being carried out a preliminary study for a compact MBR system, designed for 50 h.e. having reached a tank with 11 m³ divided in two areas, equalization with 3 m³ and a biological reactor with 8 m³. The membranes selected were ultrafiltration membranes by PURON® KOCH, due to its innovative and efficient cleaning system, as well as guarantees of operation.

Finally it was made a brief comparative analysis with the goal of comparing in several aspects (space, functionalities, cost, increase of capacities, start up and sludge production) an MBR system, compact or not, with other treatment systems.

This thesis has as main conclusions, that it is possible to produce a compact MBR system with a capital cost inside of the commercial boundaries, comparatively to other compact solutions. However, the MBR is always costlier in terms of Total Cost of Ownership than any other system, presenting however always advantages in terms of the relationship between treated wastewater and space.

Keywords: mbr, membranes, bioreactor, filtration, microfiltration, ultrafiltration, fouling, hollow fiber, activated sludge.

Acrónimos e Siglas

a' – factor relacionado com a síntese de material celular

b' – factor de respiração endógena

BAC – Carvão Activado Biológico

CBO₅ – Carência Bioquímica de Oxigénio

CQO – Carência Química de Oxigénio

CT – Tubos Capilares

DE – *Dead End Filtration* (Filtração por Impacto)

EPS – Substancias Poliméricas Extracelulares

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

F/M – Factor de carga mássica

FC – *Plated Filter Cartridge*

FS – *Flat Sheet* (Membranas de Folha Plana)

fv – factor de carga volúmica

h.e. – Habitantes Equivalente

H₂C₂O₄ – Ácido Oxálico

HCl – Ácido Clorídrico

HF – *Hollow Fiber* (Membranas De Fibra Oca)

HNO₃ – Ácido Nítrico

MBR – Bioreactor de Membranas

MLSS – Sólidos Suspensos no Reactor Biológico

MT – Membranas Multi Tubular

V

NaOCl – Hipóclorito de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

N-NH₄ – Azoto Amoniacal

PAC – Carvão Activado em Pó

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

P_{tot} – Fósforo Total

PVC – Poli Cloreto de Vinila

SMP – Fracção Microbiana Solúvel

SRT – Tempo de Retenção de Lamas

SST – Sólidos Suspensos Totais

SW – *Spiral Wound*

TCO – *Total Cost of Ownership*

TKN – Azoto Kjeldhal Total

TMP – Pressão Transmembranar

VLE – Valores Limite de Emissão

Índice

Agradecimentos.....	I
Sumário	III
Abstract	IV
Acrónimos e Siglas.....	V
Índice.....	VII
Índice de Quadros.....	XI
Índice de Figuras	XIII
1. Introdução.....	1
2. Objectivos	7
3. Metodologia Geral da Dissertação	9
4. Revisão Bibliográfica	11
4.1. Filtração por Membranas.....	11
4.1.2. Microfiltração	15
4.1.3. Ultrafiltração.....	16
4.2. Configuração das Membranas	17
4.3. Colmatação das Membranas – <i>Fouling</i>	23
4.3.1. Substâncias Poliméricas Extra Celulares (EPS)	29
4.3.2. Fracção Microbiana Solúvel (SMP)	30
4.3.3. Fluxo Crítico	31
4.3.4. Mecanismos de Colmatação das Membranas	32
4.3.5. Controlo da Colmatação – <i>Fouling Control</i>	37
4.4. Membranas Submersas e Não Submersas – Existe uma solução ideal? 44	
4.4.1. Investimento	45
4.4.2. Operação e Manutenção	45
4.4.3. Consequências da escolha tomada entre membranas submersas e não submersas.....	45
5. Caso de Estudo - Memória Descritiva e Justificativa do Sistema de Tratamento	51
5.1. Introdução	51
5.2. Dados Base de Projecto	52
5.2.1 Composição Quantitativa do Efluente a Tratar	52
5.2.2. Composição Qualitativa do Efluente a Tratar	52

5.3. Enquadramento legal	53
5.4. Principais Características do Sistema de Tratamento Proposto.....	53
5.5. Descrição do Sistema de Tratamento Proposto	54
5.5.1 Tratamento Preliminar (Gradagem).....	55
5.5.2 Tanque de Equalização	55
5.5.3 Tratamento Secundário (Tratamento Biológico/Filtração)	55
5.6. Dimensionamento Reactor MBR.....	59
5.6.1 Tanque de Equalização	59
5.6.2 Tanque de Arejamento	59
5.6.3 Membranas.....	60
5.6.4 Produção de Lamas.....	60
5.7. Construção do Reservatório (Reactor)	61
5.7.1 Materiais	61
5.7.2 Construção	61
5.7.3 Acabamentos	61
5.8. Equipamentos Electromecânicos.....	62
5.9. Quadro Eléctrico de Comando e Controlo (ETAR)	62
5.10. Manutenção	62
5.11. Instalação do Sistema de Tratamento	63
5.11.1 Equipamento Electromecânico (ETAR)	64
5.12. Equipamentos OPCIONAIS	65
5.12.1 Caudalímetro Electromagnético DN40.....	65
5.12.2 Sistema de desinfeccção	66
5.12.3 Desinfeccção UV.....	68
6. Análise Comparativa e Vantagens de um MBR	71
6.1. MBR vs SBR – Espaço, Funcionalidades e Custos.....	71
6.2. CAPEX e OPEX	74
6.3. MBR vs CBCP – Espaço, Funcionalidades e Custos	75
6.4. Aumento de Capacidade - Natureza Modular e Expansibilidade	77
6.5. Fase de Arranque e Produção de Lamas	78
6.6. Vantagens de um MBR.....	79
7. Conclusões.....	81
8. Perspectivas para Estudos Futuros	85
Glossário	87

Referências	89
Anexo	95

Índice de Quadros

<i>Quadro 1 - Características gerais dos processos de filtração por membranas.....</i>	<i>14</i>
<i>Quadro 2 - Materiais de Membranas de Micro filtração.....</i>	<i>16</i>
<i>Quadro 3 - Configurações de Membranas.....</i>	<i>18</i>
<i>Quadro 4 - Comparação das Configurações das Membranas.....</i>	<i>23</i>
<i>Quadro 5 - Constituintes de águas residuais que afectam o desempenho das membranas</i>	<i>24</i>
<i>Quadro 6 - Definições de Bloqueio</i>	<i>27</i>
<i>Quadro 7 - Mecanismos Possíveis de TMP JUMP</i>	<i>36</i>
<i>Quadro 8 - Composição Quantitativa do Efluente</i>	<i>52</i>
<i>Quadro 9 - Composição Qualitativa do Efluente</i>	<i>52</i>
<i>Quadro 10 - Valores Limite de Emissão e Percentagem Mínima de Remoção</i>	<i>53</i>
<i>Quadro 11 - Dimensões do Reactor</i>	<i>56</i>
<i>Quadro 12 - Características do Sistema de Arejamento</i>	<i>57</i>
<i>Quadro 13 - Dimensões do Tanque de Equalização</i>	<i>59</i>
<i>Quadro 14 - Características e Dimensões do Reactor Biológico</i>	<i>59</i>
<i>Quadro 15 - Características do Módulo da Membranas.....</i>	<i>60</i>
<i>Quadro 16 - Equipamentos Electromecânicos</i>	<i>62</i>
<i>Quadro 17 - Dimensões Depósito Doseador</i>	<i>67</i>
<i>Quadro 18 - Performance dos sistemas SBR e MBR.....</i>	<i>73</i>
<i>Quadro 19 - Custeio SBR 50 h.e.</i>	<i>73</i>
<i>Quadro 20 - Custeio MBR 50 h.e.....</i>	<i>74</i>
<i>Quadro 21 - Performance dos sistemas CBCP e MBR.....</i>	<i>76</i>

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Diagrama esquemático de um MBR a) Membranas Submersas, b) Membranas Externas.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2 - Esquema Simplificado do Processo de Filtração por Membranas</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 - (a) Filtração por Impacto (b) Filtração Tangencial</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4 - (a) Filtração DE (b) Filtração Tangencial</i>	<i>13</i>
<i>Figura 5 - Intervalos de Aplicação de Processos de Filtração por Membranas.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6 - (a) Esquema de Membranas Planas (b) Módulo de Membranas Bio-Cel®.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7 - (a) Secção de uma Membrana do tipo Fibra Oca; (b) Membranas HF PURON®</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8 - Membranas Tubulares KOCH®.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9 - Representação do sentido do fluxo. (a) FS (b) HF (c) MT</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10 - Materiais presentes no cake sludge e bulk sludge.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11 - Composição do Material Orgânico nos sobrenadantes dos EPS no (a) cake sludge e (b) bulk sludge</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12 - Tipos de Colmatação. (a) Completo (b) Standart (c) Intermédio (d) Bolo ...</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 - Distribuição do tamanho das partículas em diferentes SRT.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 14 - Relação entre Fluxo e TMP.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15 - Mecanismos de Colmatação das Membranas</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16 - Air-jet (a) Air-lift (b).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17 - Esquema de Funcionamento do Módulo de Membranas PURON™.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 18 - Caudalímetro Electromagnético DN40</i>	<i>66</i>
<i>Figura 19 - Esquemas dos sistemas de tratamento: a) SBR; b)MBR.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 20 - Esquemas dos sistemas de tratamento a) MBR b) CBCP.....</i>	<i>76</i>

1. Introdução

O aumento da população mundial, principalmente em zonas de escassez de água, intensifica o aumento da sua procura para usos domésticos, industriais, e agrícolas.

A reutilização de águas residuais pode ser apresentada como um contributo alternativo a esta procura, nomeadamente para fins não potáveis, podendo actualmente ser tratadas a níveis de qualidade que permitem a sua utilização adequada, neste contexto, sendo uma medida competitiva do ponto de vista técnico-económico. Estas utilizações, nomeadamente a rega, encontram-se mencionadas no **Decreto-Lei n.º 236/98**, definindo as normas de qualidade associadas aos diferentes usos. Também o **Decreto-Lei n.º 152/97**, refere que as águas residuais tratadas devem ser sempre que possível reutilizadas.

A reutilização de águas permite também fazer face aos recentes problemas que o nosso País enfrenta com os períodos de seca, aplicando o princípio da precaução, consignado na Lei da Água (**Lei n.º 58/2005**), evitando e precavendo eventuais cortes no abastecimento público. Desta forma, a reutilização de águas residuais tratadas, representa uma medida positiva tanto em termos económicos como ambientais, contribuindo assim para a optimização da gestão de recursos hídricos (Martins et al., 2006).

Como resposta a estes problemas, surgem cada vez mais tecnologias que permitem um tratamento eficaz de águas residuais de forma a possibilitar facilmente e com qualidade a sua reutilização para os mais variados fins.

De entre essas novas tecnologias destacam-se os sistemas MBR, *Membrane Biological Reactors*, que combinam o sistema de lamas activadas com uma filtração por membranas. Os sistemas MBR eliminam a necessidade de um

decantador secundário e de filtração terciária, possibilitando soluções mais compactas, utilizando uma micro ou ultrafiltração para a separação sólido/líquido. O módulo das membranas pode ser submerso no reactor biológico (MBR submerso), num tanque separado, ou podem ser membranas externas (Figura 1a e 1b). Esta tecnologia permite uma concentração de sólidos suspensos (MLSS) muito superior comparativamente com os sistemas convencionais, limitados pelas características necessárias para uma boa decantação da lamas, o que se revela desnecessário num MBR. O processo é normalmente operado com uma concentração de MLSS entre 8000 a 15000 mg/L, enquanto num sistema convencional a concentração situa-se entre 2000 e 8000 mg/L. Estas concentrações elevadas nos reactores, permitem uma remoção de partículas solúveis e biodegradáveis a um nível muito superior possibilitando a operação com idade de lamas muito superior (entre 20 e 100 dias), assegurando a nitrificação quando necessário, mesmo em climas frios.

Estes sistemas podem ser aplicados ao tratamento de águas residuais municipais ou industriais permitindo a sua reutilização dada a qualidade do efluente final que é possível obter.

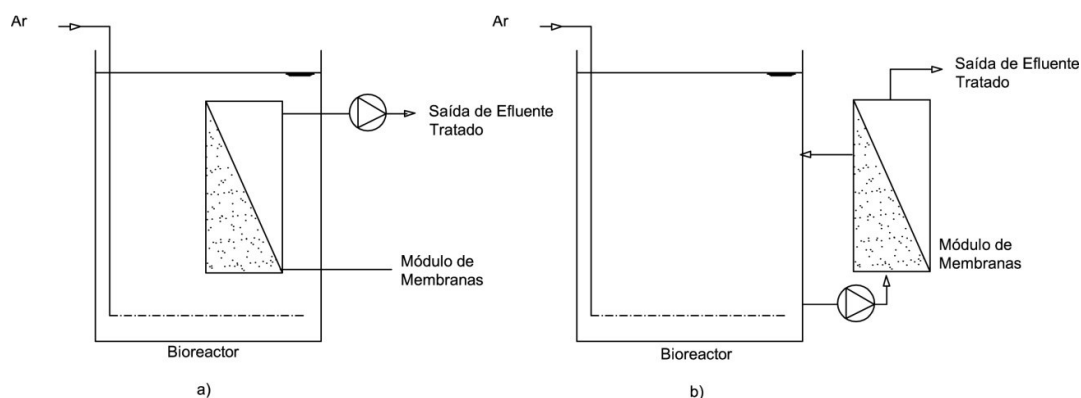


Figura 1 - Diagrama esquemático de um MBR a) Membranas Submersas, b) Membranas Externas.

Nos últimos dez anos esta tecnologia sofreu significativos avanços com o desenvolvimento de novas membranas com custos de produção e exploração

cada vez mais reduzidos, o que permitiu uma expansão nas suas aplicações, nomeadamente o aumento da sua utilização no campo da engenharia do ambiente/sanitária.

Esta tecnologia possibilita uma gama variada de aplicações, sendo adequada para tratamento de águas residuais de pequenos municípios, condomínios, casas isoladas, hotéis, zonas comerciais e industriais, bases militares, escolas e instalações desportivas.

Constitui um excelente pré tratamento para nano filtração, osmose inversa e desionização. Devido á sua configuração compacta e portabilidade, os MBR são ainda uma excelente solução como resposta para situações de emergência em estações de tratamento subdimensionadas.

O tratamento de águas residuais por filtração por membranas, apresenta inúmeras vantagens em relação ao tratamento convencional:

- Processos de decantação secundária e filtração terciária são eliminados, reduzindo o tamanho da instalação (menos 50 a 80% de área);
- A qualidade do efluente final em termos de sólidos não depende das características do reactor biológico;
- Volume do tanque de arejamento pode ser mais reduzido aumentando a concentração de MLSS;
- Não é necessário atingir ou garantir boas condições de decantabilidade das lamas;
- A idade de lamas pode ser aumentada para valores pouco usuais em sistemas tradicionais;
- Efluente final pode ser reutilizado: rega, actividades recreativas, indústria, uso doméstico ou descarga em aquíferos;
- Elevada portabilidade;

- Pode ser utilizado para aumentar a capacidade de uma instalação já existente, ou apenas ser utilizado sazonalmente;
- Pode incluir remoção de nutrientes;
- Maior eficiência que o tratamento convencional em todos os parâmetros;
- Operação e manutenção fácil;
- Necessidades de área reduzidas comparativamente com os sistemas tradicionais;
- Pode ser facilmente aumentada a capacidade da instalação (instalação modular);
- Redução da quantidade de químicos necessários na exploração.

No entanto, a aplicação desta tecnologia também apresenta desvantagens significativas entre as quais:

- Custo de primeiro investimento muito significativo;
- Elevado consumo energético, devido às altas pressões necessárias ao funcionamento;
- Necessidade de pré-tratamento;
- Vida útil das membranas de 3 a 5 anos;
- Necessidade de controlo da colmatção das membranas;
- Declínio do fluxo ao longo do tempo de exploração;
- Falta de um método de monitorização de baixo custo.

De todas estas desvantagens, a de maior importância é o controlo e minimização da colmatção das membranas, pois este fenómeno é responsável pela diminuição do fluxo. Este aspecto pode ser minimizado com a escolha adequada do material das membranas e do tipo de módulo, assim como pela optimização das condições de operação do sistema.

No entanto, a viabilidade económica de qualquer processo de separação por membranas está associada à existência de um pré tratamento eficaz, o que no caso do tratamento de águas residuais consiste pelo menos numa gradagem fina ou tamisação.

A presente dissertação insere-se no âmbito da reutilização de águas residuais e serão abordados temas como processos de filtração, configurações e materiais das membranas, colmatção das membranas e respectivo controlo, dando ênfase a membranas submersas, micro filtração e ultra filtração.

2. Objectivos

A explicação do funcionamento da tecnologia envolvida bem como a concepção de uma proposta de um reactor MBR simples, com baixo custo de produção e operação, apresentando assim uma alternativa económica de tratamento de águas residuais tornando possível e simples a sua reutilização, constituem os objectivos gerais desta dissertação.

A nível mais específico tem esta dissertação o objectivo de promover a compreensão dos mecanismos envolvidos no funcionamento de um sistema MBR como alternativa no tratamento de águas residuais, com a apresentação de um caso concreto de uma estação de tratamento de águas residuais por filtração por membranas para uma população de cinquenta habitantes equivalentes, assim como uma análise comparativa entre um sistema MBR e outras soluções existentes no mercado.

3. Metodologia Geral da Dissertação

Para além da Introdução, Objectivos e da Metodologia Geral, esta dissertação encontra-se organizada em mais quatro capítulos:

O quarto consiste numa revisão bibliográfica, onde se define o funcionamento de um MBR e o estado da arte em relação a esta tecnologia, nomeadamente no caso da acumulação das lamas nas membranas e respectiva limpeza. É também abordado o tema de membranas submersas e não submersas assim como as diferentes configurações existentes no mercado e respectivos materiais.

O quinto desses capítulos é composto por um caso de estudo, ao nível de estudo prévio, de um sistema de tratamento de águas residuais domésticas por filtração por membranas, sendo apresentada uma solução de tratamento compacta.

O sexto destes capítulos consiste numa análise comparativa entre sistemas MBR, compactos ou não, com outros sistemas de tratamento existentes no mercado para o tratamento de águas residuais.

Finalmente são apresentadas as conclusões desta dissertação, bem como sugestões para trabalhos futuros na área dos sistemas MBR.

Em termos de metodologia de abordagem destes pontos foram seguidas as etapas que se apresentam no esquema seguinte.

Revisão Bibliográfica

Filtração por
Membranas

Microfiltração e
Ultrafiltração

Configuração de
Membranas

Fouling

Membranas Submersas
vs Membranas Externas

Estudo Prévio de um MBR Compacto

Dimensionamento do Reactor Biológico

Módulo de Membranas Seleccionado

Proposta de Equipamentos Opcionais

Análise Comparativa e Vantagens de um MBR

MBR vs SBR -
Espaço,
Funcionalidades e
Custos

CAPEX e OPEX

MBR vs CBCP -
Espaço,
Funcionalidades e
Custos

Aumento de
Capacidade -
Natureza Modular
e Expansibilidade

Fase de Arranque e
Produção de Lamas

Vantagens de um
MBR

Conclusões e Recomendações para Estudos Futuros

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Filtração por Membranas

A filtração envolve a separação de partículas e matéria coloidal no seio de um líquido, o que para o caso de filtração por membranas, abrange tipicamente o intervalo de filtração para valores desde 0,0001 a 10,0 μm incluindo matéria dissolvida. O papel das membranas num MBR é servir de barreira selectiva que permita a passagem de alguns constituintes e retenção de outros (Baker, 2004, Metcalf and Eddy, 2003).

Os termos “membranas” e “processos com membranas” englobam múltiplas estruturas e processos, alguns complementares entre si, dependendo quer a selecção da membrana quer o processo a utilizar de diversos factores tais como a natureza dos constituintes da mistura, o volume de solução/suspensão a processar e o grau de separação requerido.

O processo de filtração por membranas é caracterizado pelo fluxo de alimentação ser dividido em duas vias a do concentrado e a do permeado. As partículas e os solutos retidos na superfície das membranas são continuamente removidos. A solução clarificada flui através da membrana com a designação de permeado (Figura 2).

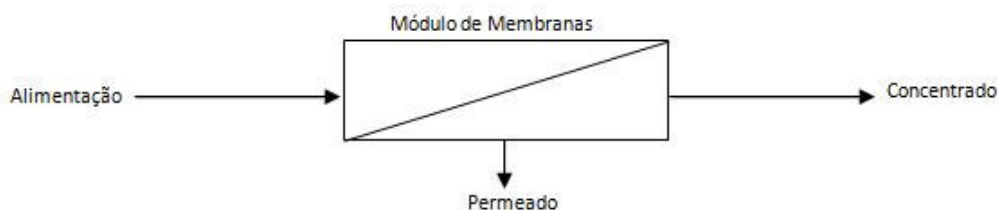


Figura 2 - Esquema Simplificado do Processo de Filtração por Membranas

As membranas podem ser classificadas de várias formas: de acordo com a sua natureza, que pode ser sintética (orgânica ou inorgânica) e biológica (viva ou não viva); com a sua estrutura ou morfologia – simétricas ou assimétricas; o tipo de aplicação a que são destinadas – separação gasosa, sólido-líquido, gás-líquido, líquido-líquido; e consoante o mecanismo de separação utilizado – exclusão, difusão, migração num campo eléctrico ou solubilidade (Mulder, 1991).

São comuns em MBR submersos, dois tipos de filtração, “*Dead End*” (filtração por impacto (DE)) em que o processo de filtração consiste na alimentação de efluente perpendicularmente ao plano da membrana, e filtração “*Cross Flow*” (filtração tangencial) onde a alimentação flui paralelamente à superfície da membrana (Figura 3).

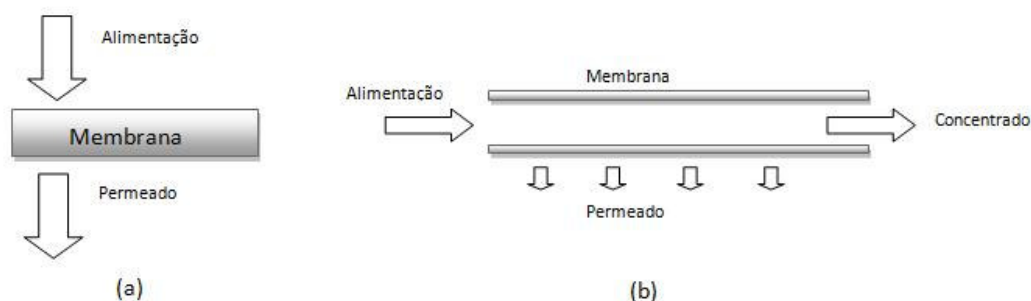


Figura 3 - (a) Filtração por Impacto (b) Filtração Tangencial

Em filtração DE, dá-se a formação de um bolo na superfície da membrana, bolo este que vai aumentando proporcionalmente ao tempo de filtração, afectando a velocidade de filtração e aumentando a energia necessária a este processo. Em filtração tangencial não se chega a formar o bolo referido anteriormente, o que facilita o processo de filtração, no entanto ocorre uma deposição de partículas na superfície das membranas. Na Figura 4 pode ser observada a diferença entre filtração por impacto e filtração tangencial em

função da sua relação com o tempo e a formação do bolo na superfície da membrana.

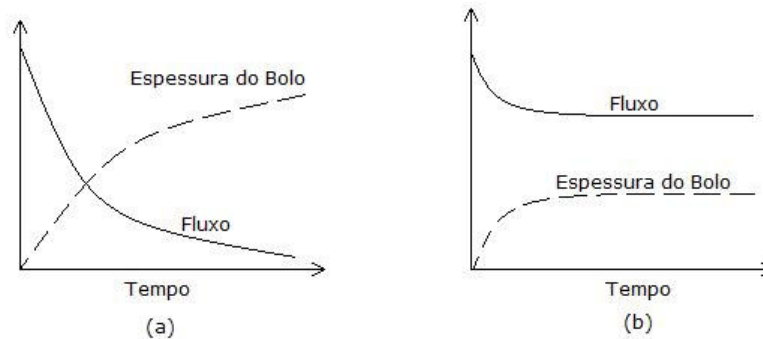


Figura 4 - (a) Filtração DE (b) Filtração Tangencial (Adaptado de (Ho and Sirkar, 1992))

A Figura 4 (a) representa uma filtração por impacto e, como se pode observar, a espessura do bolo aumenta ao longo do tempo, pois ficam retidas partículas na superfície da membrana, o que resulta num declínio do fluxo. Como resultado, sistemas que usem este tipo de filtração, periodicamente necessitam de paragens para que as partículas adjacentes às membranas possam ser removidas ou, em casos mais extremos substituídas. Na Figura 4 (b), encontra-se representada a filtração tangencial que, como mostra a figura, é atingido um fluxo quase constante, o que acontece quando a formação de bolo também atinge um estado quase estacionário. Na prática, o declínio do fluxo a longo prazo é observado mesmo após a formação do bolo ter estagnado, o que significa o início do *fouling* (Ho and Sirkar, 1992).

De acordo com o tamanho de partículas retidas nas membranas e os constituintes removidos, existem vários processos de separação por membranas sendo os mais importantes apresentados no Quadro 1 e representado na Figura 5.

Quadro 1 - Características gerais dos processos de filtração por membranas (adaptado de (Metcalf and Eddy, 2003))

Processo de Filtração	Tamanho dos poros (nm)	Intervalo de operação (μm)	Descrição do Permeado	Constituintes removidos	Outras Aplicações
Microfiltração	Macroporos (> 50)	0,08 – 2,0	Água + solutos dissolvidos	SST, turvação, protozoários, algumas bactérias e vírus	Clarificação e esterilização de suspensões em indústria química e farmacêutica, colheita de células, biomedicina.
Ultrafiltração	Mesoporos (2 – 50)	0,005 – 0,2	Água + pequenas moléculas	Macromoléculas, coloides, a maioria das bactérias, alguns vírus e proteínas	Industria alimentar, farmacêutica, têxtil e metalúrgica.
Nanofiltração	Microporos (< 2)	0,001 – 0,01	Água + moléculas muito pequenas + solutos iônicos	Pequenas moléculas, alguma dureza e vírus	Dessalinização de água, remoção de micropoluentes e amaciamento de água.
Osmose Inversa	Compactos (< 2)	0,0001 – 0,001	Água + moléculas muito pequenas + solutos iônicos	Pequenas moléculas, cor, dureza, sulfatos, nitratos, sódio e outros iões	Dessalinização de água, purificação de água, processos de concentração na indústria alimentar (sumos de frutas, café e leite)

Dimensão das partículas	Intervalo atômico/iônico		Intervalo de micro partículas			Intervalo de macro partículas	
μm		0.001	0.01	0.1	1.0	10.0	
nm		1	10	100	1000	10000	
peso molecular	100	200	1000	100000	500000		
solutos	sais aquosos	sílica coloidal			células de levedura		
	iões metálicos		vírus		bactérias		
	açúcares		proteínas				
		micro solutos					
processos de separação por membranas	electrodíálise						
	osmose inversa						
		nanofiltração					
	pervaporação		ultrafiltração				
		diálise			microfiltração		

Figura 5 - Intervalos de Aplicação de Processos de Filtração por Membranas ((Teixeira, 2001))

Nesta dissertação serão abordadas apenas a microfiltração e a ultrafiltração visto serem os mais comuns no tratamento de águas residuais municipais, havendo referência aos restantes processos de separação quando tal for necessário para a compreensão e integração do processo em estudo.

4.1.2. Microfiltração

A microfiltração segundo Baker (2004) e Mulder (1991) é o processo de filtração por membranas que mais se assemelha com uma filtração vulgar e/ou grosseira, funcionando entre um filtro convencional e uma ultra filtração, sendo um processo óptimo para remoção de suspensões e emulsões.

Em termos morfológicos as membranas de microfiltração podem ser simétricas (isotrópicas) ou assimétricas (anisotrópicas), correspondendo a:

- a) Simétrica – O diâmetro dos poros não varia ao longo da secção recta da membrana;
- b) Assimétrica – O diâmetro dos poros aumenta ao longo da secção recta. Quando apresentam esta morfologia, por vezes são formadas por uma camada mais fina onde assenta uma subestrutura mais grossa altamente porosa, servindo esta de suporte à estrutura fina. Em relação à velocidade de transporte, esta é sobretudo ditada pela camada fina o que tem a vantagem de combinar a selectividade de uma membrana densa com a velocidade de permeação de uma mais fina.

As membranas de micro filtração podem ser elaboradas em diferentes materiais, sendo estes orgânicos (polímeros) ou inorgânicos (cerâmica, metais ou vidro), hidrofílicas ou hidrofóbicas (Quadro 2).

Quadro 2 - Materiais de Membranas de Micro filtração (Adaptado de (Mulder, 1991))

Tipo de Membrana	Material
Hidrofóbica	Politetrafluoretileno (PTFE, teflon)
	Polipropileno (PP)
	Polietileno (PE)
Hidrofílica	Esteres celulósicos
	Policarbonato (PC)
	Polissulfona (PSf)
	Polieterssulfona (PES)
	Poliamida (PA)
	Polietercetona
Cerâmica	Alumina (Al_2O_3)
	Zirconia (ZrO_2)
	Titânio (TiO_2)

4.1.3. Ultrafiltração

Este tipo de filtração é utilizado na separação, purificação ou concentração de proteínas e outras macromoléculas ou colóides que possam conter alguns sais e pequenas moléculas como substratos residuais e outros metabolitos.

As membranas utilizadas em ultrafiltração são geralmente assimétricas e são constituídas por uma camada ultrafina com uma espessura de 1 μm ou até mesmo inferior, poros bem definidos responsáveis pelas características de exclusão da membrana e por uma subcamada de espessura entre 100 e 200 μm com poros em forma de canais, o que explica os elevados fluxos transmembranares obtidos por estas membranas.

Em ultrafiltração, são usadas correntemente membranas preparadas a partir dos seguintes matérias poliméricas:

- Polissulfona / Polieterssulfona;
- Polivinilideno fluorado;
- Poliacrilonitrilo;

- Acetato de celulose e outros derivados celulósicos;
- Poliamidas alifáticas;
- Polietercetona.

4.2. Configuração das Membranas

As configurações das membranas, isto é, a sua geometria e a forma como são colocadas em relação ao fluxo de água, são cruciais para a performance de todo o processo. Idealmente, as membranas devem apresentar:

- i. Elevada área de forma a evitar ou diminuir o risco de *bulking*;
- ii. Elevada turbulência;
- iii. Baixo consumo energético por unidade de água tratada;
- iv. Baixo custo por unidade de área da membrana;
- v. Configuração que facilite a limpeza;
- vi. Configuração que permita a formação de módulos.

Por definição, todas as configurações permitem a formação de módulos (vi), apresentando por si só uma característica atractiva do tratamento por membranas. Este aspecto também significa que em termos de custo de membranas, não é aplicada economia de escala sendo cada situação específica e proporcional ao caudal a tratar, ou seja, o custo das membranas mede-se pela área necessária que é directamente proporcional ao caudal de água residual a tratar. Contudo, os restantes pontos referidos estão intimamente ligados, por exemplo, promover elevada turbulência (ii) resulta num aumento do consumo de energia (iii), a limpeza mecânica directa das membranas (v) só é possível em membranas com pequena área filtrante (i) e módulos com baixa área filtrante aumentam o custo total por unidade de membrana (iv), mas é inevitável uma

vez que a limpeza das membranas é um ponto fundamental em sistemas MBR onde as concentrações de SST e MLSS no reator são extremamente elevadas.

Existem seis configurações implementadas em sistemas de membranas, onde cada uma apresenta as suas vantagens e desvantagens (Quadro 3). Estas configurações têm como base a sua geometria plana ou circular e incluem (Judd, 2006):

- a) *Plate-and-frame / Flat Sheet* (FS)
- b) *Hallow Fiber* (HF)
- c) *Multi Tubular* (MT)
- d) *Capillary Tube* (CT)
- e) *Pleated Filter Cartridge* (FC)
- f) *Spiral Wound* (SW)

Quadro 3 - Configurações de Membranas (Adaptado de Judd, 2006)

Configuração	Custo	Turbulência	<i>Backflush</i>	Aplicações
FS	Alto	Suficiente	Não	DE, UF, OI
HF	Muito Baixo	Muito Fraca	Sim	MF, UF, OI
MT	Muito Alto	Muito Boa	Não	UF, NF, efluente com concentração de SST elevado
CT	Baixo	Suficiente	Sim	UF
FC	Muito Baixo	Muito Fraca	Não	Efluente com baixa concentração de SST
SW	Baixo	Fraca	Não	OI, NF, UF

Nota: DE – *Dead End*, UF – Ultra Filtração, OI – Osmose Inversa, NF – Nano Filtração, MF – Micro Filtração.

Destas configurações, apenas as a), b), e c) são aplicadas à tecnologia MBR, devendo os módulos permitir turbulência, facilidade de limpeza ou, preferencialmente, os dois. A promoção de turbulência pode surgir através da passagem do efluente numa mistura de ar/agua através da superfície da membrana por forma a auxiliar a passagem do permeado. Esta operação de

filtração tangencial é muito usada em várias tecnologias de membranas e a sua eficiência aumenta com o aumento da distância intersticial das membranas. Dado que os módulos MT operam com a passagem de caudal do interior da membrana para fora do tubo enquanto que HF operam de fora para dentro, a distância intersticial é definida por:

- O diâmetro do tubo para MT;
- A distância entre filamentos para HF;
- A largura do canal para FS.

A densidade de filamentos em membranas HF é um ponto fundamental, uma vez que se for demasiado elevado vai reduzir o espaço intersticial, aumentando o risco de entupimento. Os módulos CT, que para todo o efeito são HF com o fluxo invertido, têm um diâmetro demasiado estreito para cumprirem os requisitos necessários num MBR, uma vez que o risco de entupimento é muito elevado.

A limpeza física é simplificada, promovendo uma inversão de fluxo (*backflush*), numa taxa de 2 a 3 vezes o fluxo normal, de forma a remover as lamas acumuladas na parte exterior da membrana. Para que este processo seja praticável, a membrana deve ser resistente o suficiente para suportar o stress hidráulico transmitido, ou seja, deve aguentar forças de pressão quando o fluxo é normal e forças de tensão quando o fluxo é invertido. Este aspecto limita o uso de *backflush* a membranas poliméricas em forma de CT e HF (Judd, 2006).

As configurações mais usadas referidas anteriormente são:

a) Flat Sheet

Flat Sheet significa “Folha Plana”, ou seja, como o nome indica uma membrana plana. Estas membranas podem ser associadas em série ou na forma simples. Quando associadas em série, as membranas são separadas entre si e colocadas em forma de módulo, onde as extremidades das membranas estão

ligadas para que a alimentação não entre em contacto com o permeado, onde a solução a filtrar atravessa as membranas com fluxo tangencial seguindo assim para o tubo de recolha. Em caso de filtração na forma simples, a membrana é circular e o fluxo é igualmente tangencial. A Figura 6 (a) representa um esquema de filtração por membranas deste tipo, enquanto a Figura 6 (b) representa um módulo de membranas *flat sheet* de um fabricante.

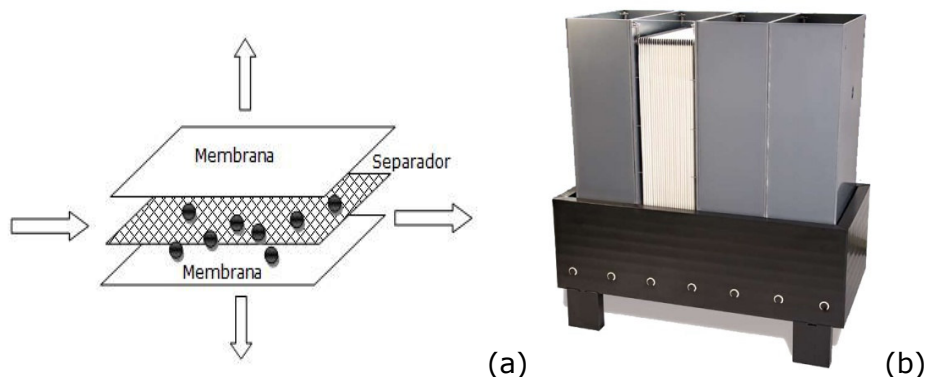


Figura 6 - (a) Esquema de Membranas Planas (b) Módulo de Membranas Bio-Cel®(Nadir)

b) Hollow Fiber

As membranas deste tipo são formadas por filamentos ou tubos de fibra oca, onde uma das mais importantes vantagens é o seu volume compacto com uma elevada área de membrana. O diâmetro dos filamentos varia entre 50 e 3000 μm , e são agrupadas em módulos cujo comprimento total dos filamentos pode atingir vários quilómetros. Devido a esta enorme extensão, os módulos não podem conter filamentos partidos ou defeituosos, o que implica uma elevada capacidade de construção e requerem um controlo de qualidade extremamente exigente. Os conjuntos de fibras ocas são posicionados paralelamente num invólucro sendo as extremidades fixas ou apenas a extremidade inferior através de uma resina, normalmente à base de epóxico (Baker, 2004). A maioria dos fabricantes de membranas deste tipo utiliza membranas anisotrópicas, o que

permite a obtenção de fluxos mais elevados de permeado (Catarino, 2000). Na Figura 7 (a) apresenta-se uma fotografia de microscópio electrónico da secção de uma membrana de fibra oca e na Figura 7 (b) apresenta-se um exemplo de um fabricante deste tipo de membranas.

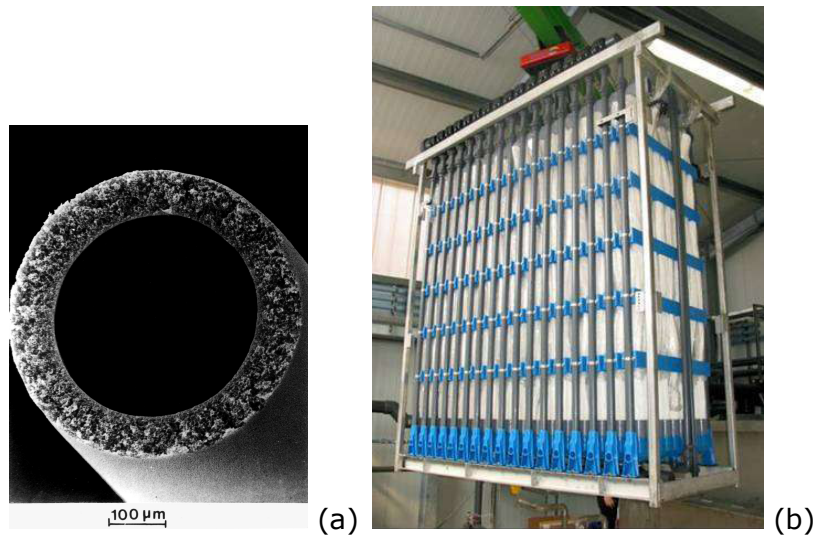


Figura 7 – (a) Secção de uma Membrana do tipo Fibra Oca (IGB, 1997); (b) Membranas HF PURON®(Raina, 2007)

c) Multi Tubular

Este tipo de membranas são geralmente aplicadas fora do reactor, ou seja, são membranas externas cujo material varia entre PVDF (polyvinylidene fluoride) e PS (polysulfone) e apropriadas para efluentes com elevadas concentrações de sólidos ou potencial para colmatção (KOCH, 2008, Metcalf and Eddy, 2003). Estas membranas são colocadas em tubos de aço inox, plástico ou cerâmicos resistentes a altas pressões e podem conter uma ou varias membranas, formando módulos que podem ser ligados em serie ou paralelo. A forma de filtração é por fluxo tangencial, sendo a alimentação introduzida sobre pressão no interior do tubo, permeando através da membrana e o produto é recolhido no outro extremo da membrana (Mulder, 1991, Catarino, 2000). Estas unidades são as de mais fácil limpeza, que é conseguido com a circulação de químicos entre as

membranas. São também o tipo de membrana que necessita de maior investimento inicial, devido ao seu próprio custo e dos periféricos que necessita (Metcalf and Eddy, 2003). Na Figura 8 é apresentado um exemplo de um fabricante de membranas MT.



Figura 8 - Membranas Tubulares KOCH®(KOCH, 2008)

O funcionamento de membranas FS, HF e MT é apresentado na Figura 9 recorrendo a um esquema que representa o sentido do fluxo em cada uma destas configurações. No Quadro 4 encontram-se sumarizadas as vantagens e desvantagens dos três tipos de configuração descritos anteriormente.

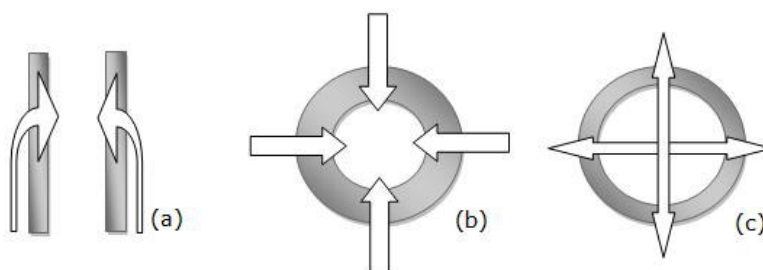


Figura 9 - Representação do sentido do fluxo. (a) FS (b) HF (c) MT

Quadro 4 - Comparação das Configurações das Membranas

Configuração	Vantagens	Desvantagens
Flat Sheet	Baixo custo de operação	Elevado custo de investimento
	Bom controlo de caudal	Elevado conteúdo sólido pode bloquear os canais de filtração
	Baixas perdas de pressão	Desmontar o módulo é moroso
	Tecnologia conhecida	
Hollow Fiber	Baixo custo de investimento	
	Baixas quebras de pressão	
	Elevada área de filtração num pequeno volume de módulo	Em caso de falha é necessária a substituição do módulo
	Baixos volumes de retenção	
Multi Tubular	Bom controlo de caudal	Elevados custos de investimento e operação
	Limpeza fácil	Elevado volume de retenção
	As membranas podem ser substituídas individualmente	Elevada queda de pressão
	As membranas inorgânicas podem operar a elevadas temperaturas com solventes orgânicos	Baixa área de filtração por unidade de volume de módulo

4.3. Colmatção das Membranas – *Fouling*

Um dos maiores obstáculos no tratamento de águas residuais com membranas é o “*membrane fouling*”, ou seja, a deposição e acumulação de constituintes da água residual na superfície e interior das membranas, o que leva a uma deterioração da permeabilidade das mesmas. Este termo é utilizado para descrever o preenchimento dos poros e o bloqueio da camada externa pela deposição de partículas e colóides na superfície das membranas e precipitação de materiais finos e/ou dissolvidos. Normalmente, este fenómeno resulta num decréscimo do fluxo e perda de pressão através das membranas, o que leva ao aumento do consumo de energia como forma de compensar as perdas, à limpeza frequente das membranas e consequentemente ao aumento dos custos de manutenção e operação.

Existem de acordo com Metcalf (2003) três tipos de *membrane fouling*, onde são considerados os constituintes da água residual e a forma como afectam o desempenho das membranas (Quadro 5).

Quadro 5 - Constituintes de águas residuais que afectam o desempenho das membranas (Metcalf and Eddy, 2003)

Tipo de Membrane Fouling	Constituintes Responsáveis	Observações
<i>Sludge Cake</i> (bolo)	Óxidos Metálicos Orgânicos e Inorgânicos Coloides Bactérias Microrganismos	Estragos nas membranas podem ser limitados controlando a presença destas substâncias.
Precipitação de Sais	Sulfato de Cálcio Carbonato de Cálcio Fluoreto de Cálcio Sulfato de Bário Formação de Óxidos Metálicos Sílica	Pode ser reduzido limitando a concentração de sais, adicionando-se ácido para limitar a formação de carbonato de cálcio, e outros tratamentos químicos.
Estragos nas Membranas	Ácidos Bases pH extremos Cloro Livre Bactérias Oxigénio Livre	Estragos nas membranas podem ser limitados controlando a presença destas substâncias. A extensão dos danos depende da natureza das membranas.

A formação de bolo é a principal causa do *fouling* em MBR submersos, uma vez que em processos de filtração por membranas é inevitável a deposição de lamas na superfície das membranas.

O que pode levar a esta acumulação de lamas é a irregular distribuição de ar na limpeza automática das membranas que leva a uma cobertura parcial das mesmas, iniciando assim um progressivo aumento desta massa. Esta acumulação de lamas é aparentemente originada pela biomassa presente nas lamas, no entanto, esta deposição de lamas nas membranas não é exactamente

igual à esperada num sistema de lamas activadas convencional (Wang *et al.*, 2007). De acordo com este autor, o bolo formado num MBR com uma espessura de 1 mm deverá apresentar uma resistência à filtração de $1,7 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$, o que causa um decréscimo de pressão na ordem de $0,5 \times 10^5 \text{ Pa}$ para um fluxo de $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$. Comparando este valor com uma desidratação de lamas num sistema convencional, por filtração por vácuo, um bolo com aproximadamente 1 cm causa um decréscimo de pressão de não mais de $0,1 \times 10^5 \text{ Pa}$. Assim, a resistência à filtração é bastante superior num MBR que num sistema convencional, sendo a causa desta diferença pouco evidente, no entanto é sugerido que a diferença esteja no material orgânico do sobrenadante, pois pode ter um papel mais decisivo na capacidade de filtração das lamas.

Para se tentar descobrir estas diferenças, analisou-se a composição do *cake sludge*, que é a parte sólida do bolo, e o *bulk sludge*, que é a matéria sólida presente no reactor biológico, de forma a poderem ser comparados. Depois de um tratamento adequado com metodologia descrita por Wang *et al* (2007), foram medidas as concentrações de EPS (substâncias poliméricas extra celulares) tanto nas lamas decantadas como nos sobrenadantes. Chegou-se à conclusão, conforme demonstrado na Figura 10 que, de facto, a diferença está nos sobrenadantes, pois nas lamas decantadas as concentrações apresentam poucas diferenças (Figura 11).

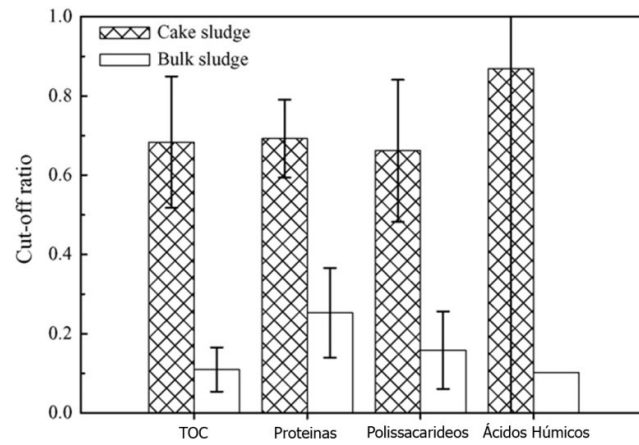


Figura 10 – Materiais presentes no *cake sludge* e *bulk sludge* (Wang et al., 2007).

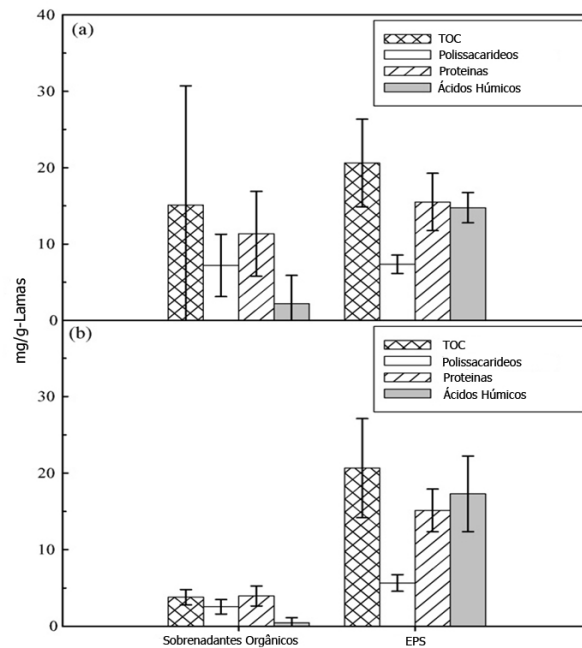


Figura 11 – Composição do Material Orgânico nos sobrenadantes e EPS no (a) *cake sludge* e (b) *bulk sludge* (Wang et al., 2007).

A forma de definir este fenómeno varia de autor para autor, no entanto genericamente poder-se-ia classificar o *fouling* em duas classes (Ho and Sirkar, 1992):

- *Fouling* Interno – Onde a acumulação do material se dá no interior da estrutura porosa da membrana, causando a colmatção da membrana.

- *Fouling* Externo – A acumulação de material dá-se na superfície da membrana à medida que se dá a filtração.

No entanto, Judd (2006) define-o de três formas diferentes (Quadro 6) e encontram-se esquematizadas na Figura 12.

- Reversibilidade de bloqueio, caracterizado pela reversibilidade de permeabilidade.
- Mecanicamente, de acordo com os mecanismos de *fouling*.
- Pelo material que é formado, definido pela sua natureza química, física ou pela sua origem.

Quadro 6 - Definições de Bloqueio (Judd 2006)

Reversibilidade de Bloqueio	Mecanicamente	Material
Reversível / Temporária: <ul style="list-style-type: none"> • Removido por limpeza física 	Bloqueio dos poros: <ul style="list-style-type: none"> • (a) Bloqueio Completo • (b) Bloqueio <i>Standard</i> • (c) Bloqueio Intermédio • (d) Formação do Bolo 	Por Tamanho: <ul style="list-style-type: none"> • Molecular, Macro molecular, coloidal ou partículas
Irreversível / Permanente: <ul style="list-style-type: none"> • Removido por limpeza química 		Carga: <ul style="list-style-type: none"> • Positiva ou Negativa (catiónica ou aniónica)
Irrecuperável / Absoluta ^a : <ul style="list-style-type: none"> • Não é removido por qualquer tipo de limpeza 		Estrutura Química: <ul style="list-style-type: none"> • Inorgânico ou Orgânico • Hidrocarbonetos ou Proteínas Origem: <ul style="list-style-type: none"> • Microbial (autóctone), Terrestre (alóctone) ou Antropogénicos • EPS ou Fracção Microbiana Solúvel (SMP)

^a Bloqueio irrecuperável a longo prazo e ilusório.

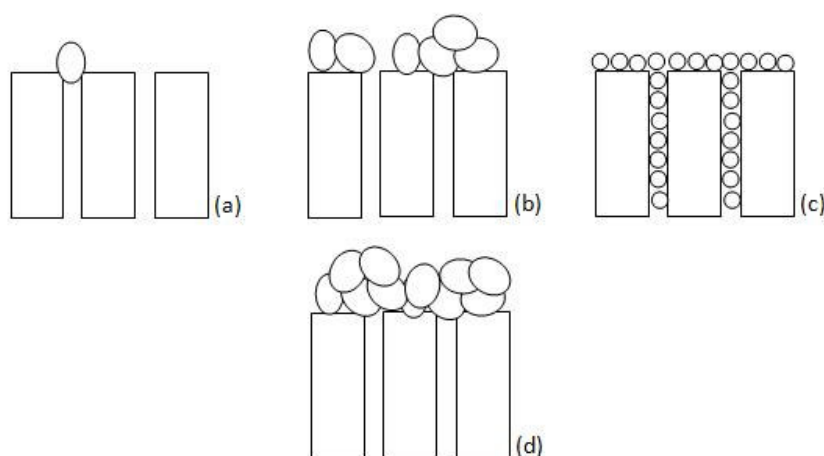


Figura 12 - Tipos de Colmatação. (a) Completo (b) Standart (c) Intermédio (d) Bolo (Adaptado de Judd, 2006)

Destes, não é conclusivo na literatura qual o que tem maior influência (Ramesh *et al.*, 2006). De acordo com Judd (2006) os aspectos físicos, nomeadamente o tamanho, é o que tem maior impacte na formação do fouling, mas segundo Kimura *et al.* (2005) e Chang *et al* (2002) os EPS são considerados os principais agentes. Outros autores atribuem o *fouling* associado aos sólidos suspensos e aos colóides. Como descrito anteriormente e seguindo Wang *et al* (2007), actualmente o *fouling* pode ser atribuído com mais certeza á concentração de EPS (Wang *et al.*, 2007). No entanto, esta versão é contrariada por um estudo levado a cabo por Drews *et al* (2007) que afirma que actualmente os principais responsáveis pelo *fouling* são os SMP. Assim, nesta dissertação vão ser explicados os efeitos destes dois responsáveis pela colmatação das membranas. É de notar que os parâmetros responsáveis pela existência destes são os mesmos como, tipo de água residual, SRT e concentração de MLSS.

4.3.1. Substâncias Poliméricas Extra Celulares (EPS)

Um floco de lamas activadas pode ser definido como entidade microbiana formada por espécies diferentes de biomassa. Os constituintes do floco estão embutidos numa rede polimérica de EPS. Uma vez que os EPS fornecem uma matriz de gel altamente hidratada nos quais os microrganismos são embutidos, forma-se uma significativa barreira ao fluxo num MBR. Os EPS microbianos são secreções mucosas de células microbianas com um peso molecular considerável e têm um papel importante na formação do floco num sistema de lamas activada. Esta matriz é bastante heterogénea incluindo, polissacarídeos, proteínas, lípidos e ácidos nucleicos. Muitos estudos sobre MBR identificam os EPS como o principal factor biológico responsável pelo *fouling* correlacionando quantitativamente os níveis de EPS com este. Para tal, foram examinadas as concentrações de EPS em lamas activadas e descobriu-se uma relação linear entre o *fouling* e a concentração de EPS (Chang *et al.*, 2002). Assim sendo, concentrações elevadas de EPS têm um efeito negativo na permeabilidade das membranas, onde a sua acumulação pode resultar num decréscimo de até 70% do fluxo inicial.

De acordo com Al-Halbouni *et al* (2008) e Drews *et al* (2006), existe uma relação entre a idade de lamas (SRT) e a concentração de EPS, afirmando que o impacto negativo observado no desempenho das membranas com SRT baixos é geralmente justificado pela concentração elevada de EPS e SMP. Neste estudo, conclui-se que concentrações elevadas de EPS provocam um impacto negativo nas propriedades das lamas (índice de filtração, sedimentabilidade). A produção excessiva de EPS na instalação piloto foi atribuída a baixos períodos de SRT, enquanto numa instalação municipal a variações sazonais. Foram descobertas fracções de elevado peso molecular de EPS, incluindo polissacarídeos e proteínas, no bolo com baixos SRT (15 dias) que não foram detectados em SRT mais

extensos (30 dias). Este tema é também abordado por Zhang *et al.*, 2006 que em vez de referir EPS, relaciona o tamanho das partículas (flocos) com a população de microrganismos em diferentes SRT, sendo a conclusão semelhante, ou seja, o tamanho das partículas são semelhantes mas com uma concentração de microrganismos inferior, contribuindo assim para um aumento do tempo de vida útil da membrana (Figura 13).

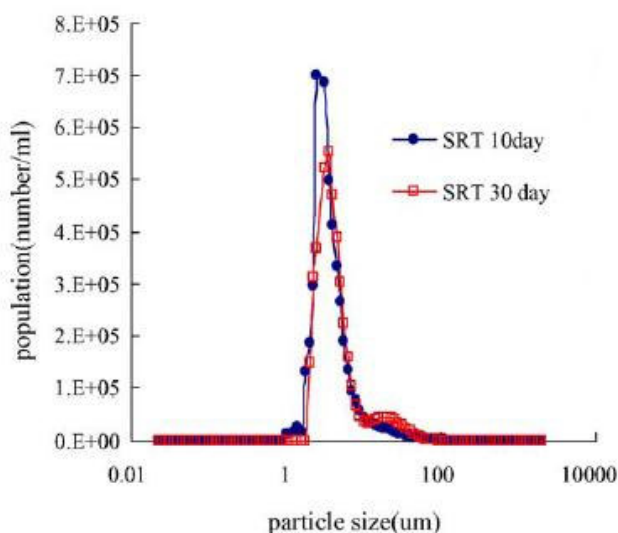


Figura 13 – Distribuição do tamanho das partículas em diferentes SRT (Zhang *et al.*, 2006)

4.3.2. Fracção Microbiana Solúvel (SMP)

SMP são definidos como componentes celulares solúveis que são libertados durante a lise celular. Os SMP podem ser divididos em duas categorias: substâncias associadas ao substrato, que são produzidas durante o metabolismo celular e produtos da biomassa, formados durante a sua degradação (Nuengjamnong, 2006). Estes produtos, têm um impacto significativo na permeabilidade das membranas pois durante a filtração são adsorvidos pela superfície das membranas, bloqueando os poros e formam uma espécie de gel que fornece os nutrientes necessários à formação de um biofilme, aumentando a resistência hidráulica (Rosenberger *et al.*, 2005).

Apesar do elevado número de publicações sobre este tema (EPS e SMP), devido à natureza complexa dos sistemas biológicos e das diferenças entre métodos experimentais e analíticos aplicados, os resultados e as diversas conclusões a que se chega são inconsistentes e até contraditórias. Nos entanto todos concordam com o facto de que tanto os EPS como os SMP são de extrema importância para a compreensão do *fouling* (Drews *et al.*, 2007).

4.3.3. Fluxo Crítico

Ao longo dos últimos anos, estudou-se o comportamento das membranas e do problema que é a sua colmatção, chegando-se à conclusão da existência de um fluxo abaixo do qual não ocorre colmatção das membranas (*fouling*) ou a partir do qual é detectável a deposição de partículas, sendo esse fluxo designado de **fluxo crítico**. Este conceito foi inicialmente apresentado por Field *et al* (1995) numa experiência realizada com dois tipos de membranas (FS e MT) e diferentes fluxos.

O conhecimento deste fluxo é essencial de forma a manter um certo nível de produtividade, tornando assim possível limitar a formação do bolo evitando a rápida colmatção das membranas. Um trabalho desenvolvido por Madaeni *et al* (1999) obteve como resultados que o fluxo crítico depende da concentração do efluente de alimentação, da velocidade tangencial e do tipo de membranas (Madaeni *et al.*, 1999). Para além destas, o valor do fluxo crítico depende de toda a hidrodinâmica do sistema e da natureza e dimensões das partículas em filtração, sendo por isso necessário aferir as condições correspondentes à situação óptima de cada sistema. Assim, é possível trabalhar abaixo do fluxo crítico e aumentar a pressão transmembranar de modo a obter um maior fluxo de permeado sem ocorrer um acréscimo do *fouling*. Verificou-se ainda que caso um aumento de pressão faça exceder o fluxo crítico, ocorre uma diminuição

da pressão transmembranar, não restituindo as condições originais de fluxo, verificando-se histerese no ciclo de pressões, principalmente devido ao *fouling* que entretanto se formou (Catarino, 2000).

Judd (2006) refere que é possível observar uma zona de transição entre a perda de fluxo e o início da colmatção das membranas (Figura 14). Isto deve-se à existência de uma relação linear entre a perda de fluxo, consequente aumento da TMP e início da colmatção. Nesta zona o fluxo é designado de “fluxo crítico secundário” (Judd, 2006).

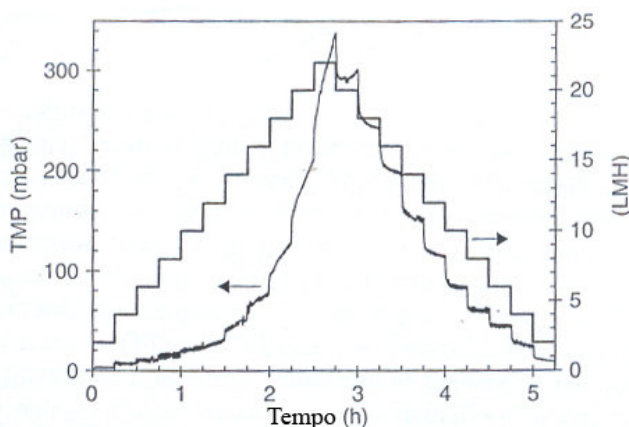


Figura 14 - Relação entre Fluxo e TMP (Adaptado de (Judd, 2006))

Mais recentemente surgiu ainda um novo conceito, o de “fluxo sustentável” caracterizado pelo aumento gradual da TMP mas por forma a que uma limpeza química não seja necessária.

4.3.4. Mecanismos de Colmatção das Membranas

Vários autores abordam este tema, no entanto, todos remetem para o mesmo trabalho de Zhang *et al* (2006), onde é referido que os mecanismos que levam ao *fouling* e consequente aumento da pressão transmembranar (TMP) e

degradação prematura das membranas, podem ser repartidos em três estágios (Zhang *et al.*, 2006):

- (i) Estágio 1 – a curto prazo, a TMP sofre um pequeno aumento devido ao condicionamento do *fouling*;
- (ii) Estágio 2 – a longo prazo, a TMP aumenta de forma linear ou exponencial num determinado período (i.e. semanal);
- (iii) Estágio 3 – aumento súbito da TMP, denominado de “*TMP jump*”.

Para uma operação sustentável de um MBR, o ideal é levar ao limite o estágio 1, prolongar o estágio 2 e evitar o estágio 3, uma vez que este é de difícil recuperação. Dentro destes estágios prevalecem vários mecanismos, esquematizados na Figura 15.

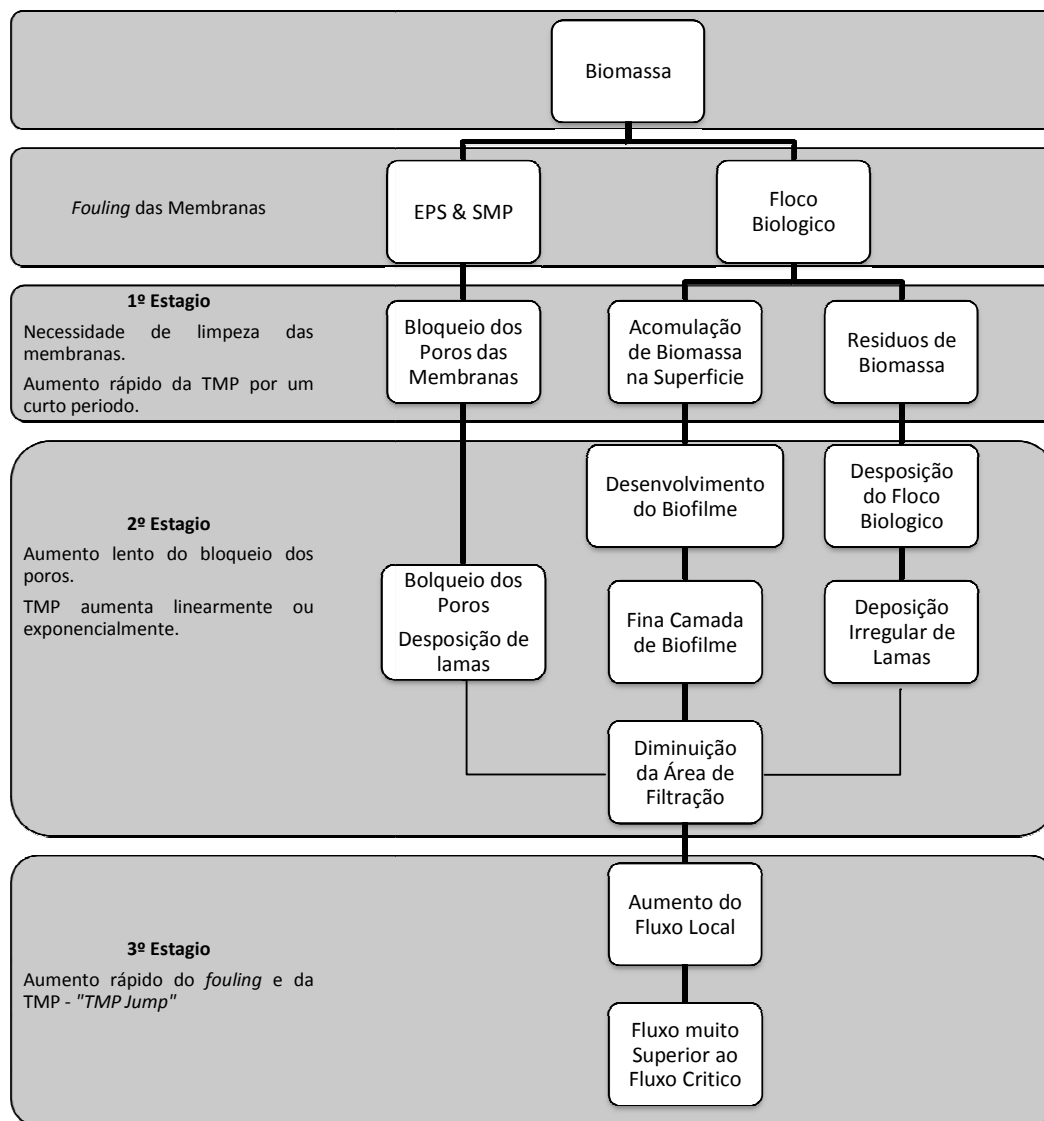


Figura 15 - Mecanismos de Colmatção das Membranas (Adaptado de Zhang *et al.*, 2006)

Segundo o procedimento experimental de Zhang *et al* (2006) o primeiro estágio começa com um mecanismo de colmatção dos poros da membrana por pequenas partículas. Estas pequenas partículas, acumuladas nas membranas e "comprimidas" pelo fluxo de alimentação, fazem com que a temperatura aumente. Neste estágio inicial têm lugar fortes interações entre a superfície das membranas e os EPS e SMP presentes no reactor e para além destas substâncias pode ainda dar-se a acumulação de flocos de tamanho superior ainda não degradados. Assim, em volta das membranas começa a formar-se um biofilme

devido aos EPS e SMP. A duração deste estágio é de acordo com Judd (2006) depende do tamanho dos poros das membranas e da sua distribuição, do material da membrana e principalmente da hidrofibilidade da membrana.

Durante o segundo estágio o *fouling* ocorre de forma lenta, dando-se mesmo no caso de o MBR operar abaixo do fluxo crítico. Neste estágio é de esperar que a superfície da membrana esteja coberta de SMP o que promove a agregação de biomassa e colóides. É de esperar uma deposição irregular de biomassa na superfície das membranas que inicialmente pode não influenciar o fluxo ou a TMP, contudo com o decorrer da filtração dá-se o bloqueio parcial dos poros. Como resultado, de um momento para o outro dá-se um aumento da TMP. Os materiais responsáveis pelo bloqueio das membranas neste estágio são essencialmente os EPS (Zhang *et al.*, 2006, Judd, 2006).

No terceiro estágio existem varias zonas das membranas que não se encontram bloqueadas ou que o estão menos que outras, tendo como resultado uma permeabilidade bastante heterogénea. Nestas circunstâncias o *fouling* aumenta a uma taxa muito elevada, o que tem como consequência o súbito aumento da TMP denominado de "*TMP Jump*". Existem vários modelos possíveis que podem explicar este salto na TMP e encontram-se no quadro 7.

Quadro 7 - Mecanismos Possíveis de TMP JUMP (Adaptado de (Zhang et al., 2006)

Modelo	Descrição
<i>Fouling</i> Heterogéneo (perda de área)	O “TMP Jump” coincide com a perda local de permeabilidade em diferentes zonas da membrana devido à lenta acumulação de EPS.
<i>Fouling</i> Heterogéneo (estreitamento dos poros)	Devido à diminuição do diâmetro dos poros da membrana por acumulação de biomassa o fluxo local aumenta drasticamente. Quando o fluxo local é superior ao fluxo crítico o <i>fouling</i> aumenta exponencialmente.
<i>Fouling</i> Heterogéneo (perda de poros)	A colmatação dos poros dá-se de forma heterogénea provocando alterações na pressão de operação.
The critical suction pressure model	Aumento gradual da TMP seguido de um drástico aumento da mesma, possivelmente devido à coagulação da base do bolo, o que pode provocar um aumento na pressão de sucção.
Teoria da Percolação	A porosidade do depósito em volta das membranas vai diminuindo devido à filtração constante. Num determinado ponto critico, a TMP aumenta rapidamente.

Dos factores que afectam o mecanismo do *fouling*, destacam-se a temperatura, fluxo de alimentação e turbulência, concentração do efluente e o design do equipamento.

Temperatura – Não é ainda totalmente claro o efeito da temperatura. De acordo com Munir Cheryan (1986) o aumento da temperatura deve resultar num aumento do fluxo devido aos efeitos que daí podem advir, como a diminuição da viscosidade. No entanto pode também promover uma diminuição do fluxo, devido ao decréscimo de solubilidade de alguns constituintes do efluente e à desnaturação de proteínas, constituintes estes que posteriormente são adsorvidos pelas membranas agravando o seu bloqueio ou colmatação.

Fluxo de Alimentação e Turbulência – A velocidade de alimentação e o stress (paralelo ou tangencial à membrana) provocado pela alimentação, são de extrema importância para controlo do fluxo e do *fouling*. Stress elevado proporciona uma turbulência elevada na superfície da membrana, provocando a desagregação do *fouling* da superfície da membrana e assim diminuir a

resistência hidráulica provocada pelo mesmo. Por vezes notam-se diminuições severas no fluxo de permeado pelo facto do fluxo de alimentação também ser demasiado baixo o que provoca a acumulação de matéria na membrana.

Concentração do efluente – A concentração dos constituintes da água residual é um dos factores mais importantes, uma vez que se a concentração de sólidos no efluente aumenta, a viscosidade e densidade também aumentam, o que leva a um aumento dos materiais de *fouling*.

4.3.5. Controlo da Colmatação – *Fouling Control*

Num sistema MBR, como em muitos processos de filtração por membranas, o controlo da colmatação das membranas é o balanço entre o fluxo, protocolos de limpeza física e química e, quando relevante e necessário, alterações das condições química e biológicas no reactor biológico.

Existem várias formas de controlar a colmatação das membranas que variam consoante o autor. Metcalf and Eddy (2003) referem apenas três formas de controlo, enquanto Judd (2006) apresenta uma lista mais completa onde são também incorporadas as presentes na primeira. Assim, o controlo do *fouling* aplicado a instalações MBR é resumido a cinco estratégias principais:

1. Pré-tratamento eficaz;
2. Limpeza física e química das membranas e aplicação de protocolos de limpeza;
3. Redução do fluxo;
4. Arejamento das membranas;
5. Alterações químicas ou biológicas ao reactor biológico.

1. Pré-Tratamento do Efluente

O tratamento de águas residuais por um sistema do tipo MBR, carece de um pré-tratamento mais eficaz que um sistema convencional de lamas activadas ou SBR, onde normalmente é apenas necessária uma gradagem de cerca de 6 mm. Num sistema MBR é insuficiente uma gradagem vulgar, pois o risco de acumulação nas membranas e bloqueio dos poros aumenta, especialmente devido à presença de cabelos em efluentes municipais, formando agregados nos espaços intermembranares e arejadores.

Membranas do tipo HF têm uma maior tendência para formar agregados de cabelos e outros fragmentos no topo das membranas, sendo que os cabelos se podem entrelaçar com os filamentos das membranas, tornando impossível a sua remoção por arejamento e/ou *backflush*. Em membranas do tipo FS, a acumulação acontece no limite do canal de filtração, onde caso o sistema de arejamento falhe, os agregados expandem-se afectando toda a membrana.

Uma vez que as membranas do tipo HF são mais susceptíveis a acumulação de lamas e o impacte deste é maior, a gradagem deve ser de escala inferior, entre 0,8 e 1,5 mm. Quanto às membranas FS, estas são mais tolerantes à acumulação de à gradagem onde apenas é necessário um intervalo entre 2 a 3 mm.

2. Limpeza física e química das membranas e aplicação de protocolos de limpeza

As membranas podem ser limpas por métodos físicos ou químicos. Os métodos físicos dependem de forças mecânicas que removem as substâncias da superfície das membranas e incluem *Backflushing*, Vibrações e Ar Difuso. Estes métodos dão designados de métodos preventivos, uma vez que em casos mais extremos é utilizada a limpeza química. Os métodos químicos consistem na

adição de agentes que promovem reacções que enfraquecem as forças de ligação entre as substâncias que causam o *fouling* e quebram as forças entre estes e a superfície das membranas e incluem hidrólise, peptização, saponificação, solubilização, dispersão, coagulação/floculação (mais usual), havendo também a adição de reagentes químicos aquando do *Backflush* como NaOH, HCl e HNO₃ (Chen *et al.*, 2003, Xing *et al.*, 2003).

A limpeza pode ser efectuada de duas formas, *in situ*, designada de CIP ("*cleaning in place*") ou *ex situ*, o que implica a remoção das membranas do interior do reactor. Devido a todos os factores referidos anteriormente, a limpeza física é menos onerosa que a limpeza química, sendo um processo rápido (normalmente não ultrapassa os dois minutos). A limpeza física no entanto apenas remove a parte grosseira do *fouling* (bloqueio reversível/temporário) e a limpeza química remove o material mais resistente (bloqueio irreversível/permanente). É de notar que a permeabilidade original da membrana nunca é recuperada pois mantêm-se sempre um residual que é definido como "bloqueio irrecuperável", sendo este que, com a sua acumulação ao longo dos anos, determina o tempo de vida da membrana (Ho and Sirkar, 1992).

É importante antes de explicar a aplicação dos protocolos de limpeza, referir o conceito de *backflush*, ou seja, operação de retro lavagem de alta frequência. Esta lavagem associa ao sistema uma técnica de retro lavagem como forma de reduzir o declínio do fluxo verificado ao longo da filtração, consistindo na inversão periódica do sentido do fluxo de permeado fazendo com que a camada de bolo formada seja removida. Geralmente o intervalo de tempo entre cada pulso de retro lavagem é entre cinco e quinze minutos, sendo a duração de cada pulso entre dez e sessenta segundos (Catarino, 2000, Judd, 2006). Um estudo realizado pela equipa de Stopka *et al* (2000) refere que a aplicação do

backflush com permeado tem um efeito favorável e, a partir de uma determinada frequência, permite um acréscimo do fluxo médio na ordem dos 50 a 100%.

Uma variante do *backflush*, consiste na diminuição do intervalo entre pulsos e de cada pulso, passando para valores de 3 e 0,05 segundos, respectivamente, diminuindo assim o tempo em que não ocorre filtração. Nestas circunstâncias, o tempo de retro lavagem é muito baixo e a pressão é superior (cerca de um bar acima da pressão de alimentação), esta forma de retro lavagem é designada de *backshot*.

Passando aos protocolos propriamente ditos, estes consistem nos intervalos de tempo entre a filtração e as operações de lavagem, tanto física como química e dependem de vários factores, como o tipo de efluente, o tipo de membrana, o fluxo de alimentação, e são normalmente ajustados em fase de exploração das instalações.

A título indicativo tem-se um estudo desenvolvido por Roeste *et al* (2002) com vários fabricantes de membranas onde no caso das KUBOTA® do tipo FS, o ciclo era de dois minutos de relaxamento com ar por cada oito minutos de filtração. A limpeza química é efectuada com uma solução de 5 mg/L de NaOCl seguida de outra com uma solução a 1% de H₂C₂O₄. Estas operações foram realizadas *in-situ*. No caso das membranas X-FLOW® do tipo MT, a limpeza química é efectuada duas a quatro vezes por ano com uma solução de NaOCl seguida de uma solução ácida não especificada. O *backflush* é aplicado automaticamente por perda de fluxo (Roest *et al.*, 2002). Outro caso de estudo é uma instalação com membranas ZENON® do tipo HF, onde a filtração ocorria durante nove minutos seguido de um minuto de paragem sem *backflush* de permeado, no entanto mensalmente é efectuada uma limpeza de manutenção CIP com uma solução de 100 g/m³ de NaOCl (Guglielmi *et al.*, 2007).

3. Redução do Fluxo

O fluxo é um factor importante num MBR, sendo o parâmetro responsável pelo declínio da permeabilidade das membranas. O fluxo determina os ciclos de limpeza física (*backflush* e relaxamento) e filtração.

A redução do fluxo é extremamente importante na medida em diminui sempre a velocidade da acumulação de lamas nas membranas, no entanto, tem um impacto directo no investimento inicial, aumentando o custo da instalação, uma vez que é necessária maior área de filtração. Este aspecto foi explicado no ponto **4.3.3.** onde se refere que a diminuição do fluxo deve ser feita de forma a este ser inferior ao fluxo crítico.

4. Arejamento das membranas

O arejamento por ar difuso das membranas é essencial para diminuir o efeito de acumulação de lamas nas membranas, principalmente em MBR submersos, pois esta configuração permite o contacto directo entre as bolhas de ar e a superfície das membranas, induzindo um stress nas membranas perpendicular ao fluxo. Uma vez provocado este stress e aumentando o caudal de ar injectado, em membranas do tipo HF o fluxo torna-se mais eficaz e a acumulação de lamas leva mais tempo até provocar o bloqueio dos poros das membranas (Chang and Judd, 2002).

Existem dois tipos principais de arejamento, o *air-jet* onde o ar é introduzido intermitentemente a partir do fundo do módulo das membranas e o *air-lift* em que são introduzidas bolhas grossas no interior das membranas de forma a provocar uma turbulência moderada no reactor (Figura 16)

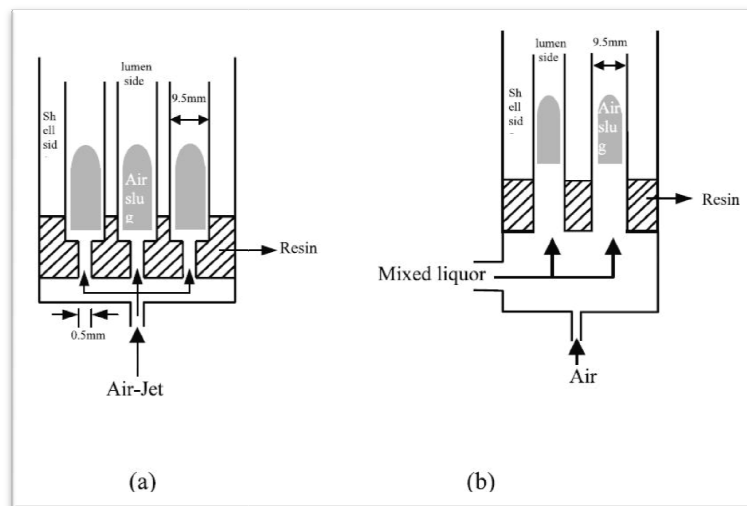


Figura 16 - Air-jet (a) Air-lift (b) (Chang and Judd, 2002)

Conforme o estudo de Chang and Judd (2002), o mais eficaz é o módulo de *air-lift* onde o fluxo de permeado foi sujeito a um aperfeiçoamento de 43%, enquanto o módulo *air-jet* sofreu uma acumulação gradual de biosólidos nos poros das membranas. Apesar das conclusões retiradas deste estudo, os autores afirmam que é necessária mais pesquisa em termos de optimização do design das membranas e condições de operação.

No entanto, estudos mais recentes indicam que o stress tangencial aplicado às membranas pode ter um efeito negativo, provocando um decréscimo do fluxo quando é atingido um estado quase estacionário do *fouling* (Choi *et al.*, 2005).

5. Alterações químicas ou biológicas ao reactor biológico

A qualidade da biomassa pode ser controlada bioquimicamente através do ajuste do SRT, quimicamente com a adição de coagulante ou floculantes e agentes adsorventes (Al-Halbouni *et al.*, 2008) (Judd, 2006, Kim *et al.*, 1998). Independentemente da técnica utilizada, dá-se um aprimoramento da

permeabilidade das membranas. O ajuste de SRT foi anteriormente referido, sendo as restantes apresentadas de seguida.

Coagulação/floculação – a adição de agentes coagulantes ou floculantes, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, surgem como um melhoramento na diminuição do *fouling*. A adição destes agentes leva a um decréscimo acentuado da concentração de SMP bem como a um aumento na performance hidráulica das membranas. Estes agentes promovem a formação de agregados biológicos que sedimentam com facilidade, pelo que é aconselhado uma operação de decantação primária. De entre estes agentes e apesar ter um custo superior, o mais eficiente é o cloreto férrico, que provoca a formação de precipitados férricos específicos como o fosfato férrico, diminuindo assim o *fouling*.

Agentes adsorventes – a adição de agentes adsorventes no reactor biológico ajuda na diminuição da concentração de compostos orgânicos. Alias, uma das formas de diminuir a concentração de EPS e SMP e assim diminuir o seu efeito no *fouling*, é adicionar carvão activado em pó (PAC) no reactor biológico de um MBR, permitindo o aumento da permeabilidade da membrana. As lamas que resultam desta adição são denominadas de “*BAC Sludge*”, ou seja, lamas biológicas de carvão activado (Kim *et al.*, 1998). Outro estudo consiste novamente na adição de PAC ao reactor biológico e tem como conclusões que a dose óptima de PAC é de 1,2 g/L tendo como resultado uma diminuição do tamanho dos flocos e da viscosidade, que são os parâmetros que influenciam a formação do bolo (Judd, 2006). Os MBR onde se dá a adição de PAC são designados de MBR híbridos.

Mais recentemente, foi estudada uma forma de comparar a performance hidráulica entre uma pré floculação e a adição de PAC num sistema MBR de HF por microfiltração. Os resultados obtidos por Guo *et al* (2004) nos dois casos

foram bastante positivos, tendo tido para a pré floculação, um ligeiro aumento do fluxo crítico, que sem pré floculação era de $150 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ e após a pré floculação passou a $200 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$. Este facto deve-se a que a pré floculação apenas remove os colóides orgânicos. Quanto à adição de PAC, esta foi efectuada em dois casos distintos, sem pré floculação (i) e com pré floculação (ii). Em (i) o aumento foi exponencial, passando a $900 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$. Em (ii) o aumento do fluxo crítico foi ainda superior, tendo-se atingido valores de $1400 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ (Guo *et al.*, 2004).

4.4. Membranas Submersas e Não Submersas – Existe uma solução ideal?

Um dos principais problemas que surgem num MBR é a escolha das membranas, se estão submersas no reactor biológico ou são do tipo não submerso e encontram-se no exterior do reactor biológico.

Existem vários factores a considerar na escolha do tipo de membranas a utilizar, factores como as características do afluente bruto e objectivos de qualidade do efluente final.

Em tratamento de águas residuais, a decisão deve ser baseada no *Total Cost of Ownership* (custo inicial e de operação) da solução escolhida, eficiência de tratamento e sustentabilidade (manutenção, capacidade de *upgrade*, produção de resíduos, entre outros).

A solução escolhida deve ter em conta no mínimo:

4.4.1. Investimento

- Resíduos produzidos pela instalação;
- Utilização de estruturas existentes;
- Impactes na rede de drenagem;
- *Integração da instalação em harmonia estética e/ou arquitectónica com a área circundante;*
- Vida útil da estrutura e equipamento escolhido;
- Custo total do tratamento.

4.4.2. Operação e Manutenção

- Fiabilidade do sistema;
- Mão-de-obra e inspecções regulares;
- Energia requerida pelo sistema;
- Substituição das Membranas e de equipamento;
- Manutenção;
- Reagentes e limpeza de membranas;
- Custo da remoção e tratamento de lamas.

4.4.3. Consequências da escolha tomada entre membranas submersas e não submersas

Resíduos produzidos pela instalação – ambas as configurações de membranas permitem o aumento da concentração de sólidos suspensos diminuindo a formação de lamas, no entanto existem duas diferenças significativas: quebra mecânica do floco em membranas não submersas resulta numa relação superfície/volume superior, reduzindo a deposição das lamas; o tamanho do reactor biológico é inferior em configurações não submersas tendo recirculação de lamas (desnecessárias em membranas submersas), o que

provoca um aumento da temperatura no reactor, reduzindo a produção de lamas.

Ambas as configurações necessitam de pré-tratamento de forma a prevenir estragos nas membranas devido a pequenos sólidos e obstruções no espaço intermembranar por materiais flutuantes, fibras e dependendo do material da membrana, ataques químicos por solventes ou outras substâncias.

Utilização de estruturas existentes – as duas configurações podem ser usadas para *upgrade* ou aumento da capacidade de tratamento de um sistema convencional de lamas activadas. O espaço necessário para membranas submersas é inferior sendo a única restrição na utilização de estruturas existentes a existência de espaço suficiente e geometria apropriada para permitir a montagem das membranas.

Impactes na rede de drenagem – ambas as configurações diminuem significativamente a área de terreno necessário para a instalação, sendo o decantador secundário substituído pelas membranas e o reactor biológico tem metade a um quarto do tamanho usual. Como resultado, os MBR podem ser instalados perto de habitações em espaços mais limitados, o que permite um investimento mais pequeno em tubagem dentro e fora da instalação.

Integração da instalação em harmonia com a área circundante – A planta compacta de ambas as configurações facilita o *design* arquitectónico da instalação. Porém, a configuração não submersa possibilita reactores biológicos menores e viabiliza mais facilmente a cobertura total da estação, tornando possível diminuir o ruído, cheiros e melhor aparência. No entanto o ruído não é significativo em nenhuma das configurações.

Vida útil da estrutura e equipamento escolhido – neste ponto as diferenças entre as duas configurações são significativas;

- Membranas submersas – neste caso, as membranas são bens consumíveis usados extensivamente, (baixa pressão tangencial, baixa taxa de permeabilidade), o que leva a tempos de vida útil de nove meses a cinco anos dependendo das condições de funcionamento.
- Membranas não submersas – estas membranas são mais facilmente limpas e podem ser regeneradas uma vez que são utilizadas mais intensivamente (altas TMP, regime turbulento, elevada taxa de permeabilidade). Assim, o tempo de vida útil é de trinta meses a dez anos dependendo do material e condições de funcionamento.

Custo total do tratamento – devido às diferenças descritas anteriormente, o tratamento é ligeiramente mais barato nos sistemas de membranas não submersas em termos de TCO que as submersas. No entanto, o custo das membranas não submersas é geralmente mais elevado que as submersas. Em caso de tratamento terciário, ambas podem ser utilizadas sem alterações.

Fiabilidade do sistema – qualquer que seja a configuração escolhida, não tem interferência na fiabilidade futura do sistema, sendo este afectado pelo equipamento escolhido para cada operação, em particular o pré-tratamento.

Mão-de-obra e inspecções regulares – o funcionamento de um MBR é facilmente monitorizado remotamente, e todas as operações podem ser automatizadas. No entanto são necessárias inspecções semanais no local que podem levar desde três a cinco horas.

Energia requerida pelo sistema – a energia difere bastante de uma configuração para outra:

- Membranas submersas – uma vez que apresentam baixa pressão tangencial e baixo fluxo de permeado, o consumo de energia é muito inferior no módulo de membranas, contudo é também necessária energia

para arejamento das membranas de forma a prevenir a obstrução das membranas por acumulação de lamas que afecta tanto membranas FS como HF que usam filtração tangencial às membranas. Este tipo de filtração (filtração tangencial submersa), resulta num aumento gradual de consumo de energia devido à obstrução das membranas, voltando ao normal quando retirado o material que provoca a obstrução.

- Membranas não submersas – nesta configuração, devido às altas pressões tangenciais, regime turbulento e elevados fluxo de permeado, o consumo de energia é superior para garantir um certo nível de turbulência nas membranas. No entanto, não é necessário arejamento nas membranas.

Substituição das Membranas e de equipamento – neste aspecto, interessa saber o tempo de vida útil das membranas uma vez que são consumíveis, sendo para membranas submersas em média de um mês a cinco anos e em membranas não submersas de três a dez anos. Quanto aos outros equipamentos são tratados da mesma forma que uma estação convencional.

Manutenção – o acesso às membranas é mais simples em não submersas, uma vez que em submersas têm de ser removidas de forma a poderem ser limpas fora do reactor biológico (quando necessário limpeza manual). A identificação de fugas, também é mais simples em não submersas devido à estrutura das membranas.

Reagentes e limpeza de membranas – membranas não submersas, requerem lavagens químicas mais frequentes com concentrações baixas de reagentes. Em membranas submersas, é necessário inverter o fluxo, de forma a limpar as lamas retidas no espaço intermembranar sendo a utilização de reagentes muito reduzida, sendo em consumíveis uma solução mais económica.

Custo da remoção e tratamento de lamas – em qualquer uma das configurações, a produção de lamas é significativamente inferior à de uma estação de tratamento convencional. Assim, o custo de remoção é quase insignificante, podendo a extracção chegar a ser feita apenas uma vez por ano (Fraval, 2005).

5. Caso de Estudo - Memória Descritiva e Justificativa do Sistema de Tratamento

5.1. Introdução

No âmbito desta dissertação é efectuada uma proposta de dimensionamento de um Sistema Compacto de Tratamento de Águas Residuais por sistema de lamas activadas e filtração por membranas (MBR Compacto), em regime de oxidação total (Arejamento Prolongado) em sistema de fluxo contínuo, trabalho realizado no âmbito da ECODEPUR[®] - Tecnologias de Protecção Ambiental.

O sistema de tratamento foi dimensionado com base nas capitações médias referidas na literatura e utilizado por esta entidade baseada nos anos de experiencia que possui, visando dar cumprimento aos Valores Limite de Emissão (VLE) estabelecidos na Legislação Vigente (Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho e o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto) para descarga em Meio Receptor Natural (Água/Solo).

Ainda que o objectivo fosse chegar à construção do protótipo proposto, sua colocação e operação do mesmo, devido ao tempo disponível para a realização desta dissertação acaba-se por apresentar apenas a proposta ao nível de estudo prévio do referido sistema de tratamento.

5.2. Dados Base de Projecto

5.2.1 Composição Quantitativa do Efluente a Tratar

Quadro 8 - Composição Quantitativa do Efluente

Parâmetro	Unidade	Valor
População	Habitantes	50
Capitação	L/hab.dia	150
Coefficiente de Afluência	Adimensional	0,80
Caudal Médio Diário	L/dia	6000
Factor de Ponta	Adimensional	10
Caudal de Ponta Horário	L/h	2496,32

5.2.2. Composição Qualitativa do Efluente a Tratar

Quadro 9 - Composição Qualitativa do Efluente

Parâmetro	Unidade	Valor
Carência Química de Oxigénio (CQO)	mgO ₂ /L	800
Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO ₅)	mgO ₂ /L	400
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	466,67
Azoto Amoniacal (N - NH ₄)	mgN-NH ₄ /L	25
Azoto Kjeldhal (TKN)	mgTKN/L	40
Fósforo Total (P _{tot})	mgP/L	26,67
Carga CQO	kgO ₂ /dia	6
Carga CBO ₅	kgO ₂ /dia	3
Carga SST	kgSST/dia	3,5
Carga N - NH ₄	kg N - NH ₄ /dia	0,15
Carga TKN	kg TKN/dia	0,24
Carga P _{tot}	kgP/dia	0,2

Esta composição qualitativa foi retirada do documento “soluções tipo para pequenas instalações de tratamento de águas residuais” produzido pela entidade Águas de Portugal (Portugal, 2002).

5.3. Enquadramento legal

O sistema de tratamento proposto foi concebido de modo a permitir o cumprimento dos limites de descarga ou as percentagens mínimas de redução constantes do Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de Junho, relativamente aos parâmetros SST, CBO₅ e CQO, desde que os valores reais de afluência sejam coerentes com os dados base admitidos em projecto e desde que se crie uma correcta rotina de exploração/manutenção do sistema de tratamento.

Quadro 10 - Valores Limite de Emissão e Percentagem Mínima de Remoção

Parâmetro	Concentração (*)	Percentagem mínima de redução (*)
Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO ₅ a 20 °C) sem nitrificação	25 mg/l O ₂	70-90
Carência Química de Oxigénio (CQO)	125 mg/l O ₂	75
Sólidos Suspensos Totais (SST)	35 mg/l	90

(*) De acordo com o Decreto-Lei 152/97 de 19 Junho, requisitos para as descargas das estações de tratamento de águas residuais urbanas sujeitas ao disposto nos artigos 5º, 6º e 8º do mesmo decreto.

5.4. Principais Características do Sistema de Tratamento Proposto

- Dimensionado de modo a dar cumprimento ao exposto na legislação aplicável vigente (Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho e o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto);
- Ausência de odores desagradáveis;
- Impacto visual nulo;

- Ruídos e vibrações desprezáveis;
- Facilidade e rapidez de instalação;
- Elevada resistência mecânica e química devido ao material de construção (aço carbono) e às protecções anti-corrosivas aplicadas;
- Tratamento por sistema de lamas activadas, em regime contínuo de baixa carga/arejamento prolongado ou oxidação total;
- Simplicidade de funcionamento e manutenção;
- Arejamento e agitação assegurados por um único componente em condições de alto rendimento;
- Funcionamento automático.

5.5. Descrição do Sistema de Tratamento Proposto

O sistema proposto é constituído pelas seguintes Operações Unitárias de Tratamento:

Tratamento Preliminar

- Tamisador do tipo step-screen (2 mm)

Tanque de Equalização

- Tanque de Equalização

Tratamento Secundário

- Tratamento Biológico por processo de Lamas Activadas em regime de oxidação total (Arejamento Prolongado), em sistema de fluxo contínuo
- Ultra filtração por Membranas (sistema MBR)

Tratamento Terciário (OPCIONAL)

- Desinfecção por Hipoclorito
- Desinfecção por Ultra Violeta

5.5.1 Tratamento Preliminar (Gradagem)

Nesta etapa proceder-se-á à remoção de sólidos grosseiros presentes no efluente, que poderão danificar e/ou entupir o sistema a jusante.

O Tamisador será colocado dentro do tanque, de forma a permitir uma solução mais compacta e a diminuir os custos de construção civil.

5.5.2 Tanque de Equalização

Esta zona tem como objectivo resolver os problemas causados por variações de caudais, de forma a permitir uma passagem constante de caudal para a zona seguinte. Neste caso, tem como função reduzir o impacte provocado pelos caudais de ponta, nomeadamente na área de membrana que irá ser necessária numa fase mais avançada do tratamento, diminuindo assim a área de membrana necessária e consequentemente o seu custo.

Nesta fase do tratamento será necessário promover agitação e arejamento de forma a manter condições aeróbias, impedindo a formação de odores desagradáveis e septicidade (Metcalf and Eddy, 2003). O efluente é bombeado para o reactor biológico de forma a ser garantido um caudal constante.

5.5.3 Tratamento Secundário (Tratamento Biológico/Filtração)

Os sistemas de tratamento tipo MBR (*Membrane Biological Reactor*), resultam da junção do tratamento por lamas activadas e neste caso uma ultrafiltração que substitui a decantação secundária, permitindo uma melhor qualidade do efluente final, pouca formação de lamas em excesso e representando uma solução mais

compacta que o tratamento convencional, sendo as suas dimensões apresentadas no Quadro 11.

Quadro 11 – Dimensões do Reactor

Parâmetro	Unidade	Valor
Volume	m ³	11
Comprimento	mm	4302
Diâmetro	mm	1800

O processo de tratamento caracteriza-se pelo facto do módulo das membranas se encontrar submerso no reactor biológico, sendo assim composto por duas fases de operação:

Arejamento

O efluente entra no reactor de lamas activadas onde é arejado através de um sistema de difusão de bolha fina, assegurando assim a degradação biológica aeróbia do efluente, garantindo-se elevados níveis de tratamento e a ausência de odores desagradáveis. Os níveis de ruído gerados pelo soprador são desprezáveis.

O arejamento da massa líquida será efectuado através de um sistema de difusão por bolha fina de alto rendimento, constituído por um conjunto de Difusores de EPDM (Sistema Anti-Colmatação) alimentados por um electro-soprador de canal lateral.

O sistema de difusão por bolha fina representa um avanço tecnológico relativamente aos sistemas de arejamento tradicionais uma vez que apresenta as seguintes vantagens técnicas:

- Distribuição Homogénea do Ar introduzido no Bioreactor, garantindo uma mistura completa no reactor e evitando zonas localizadas de perturbação, com potencial quebra dos flocos biológicos gerados;
- Elevado Coeficiente de Transferência de O₂ para a massa líquida, relativamente aos sistemas tradicionais, com consequente redução do consumo de energia verificado na Operação de Arejamento;
- Eliminação de fenómenos de colmatção, através da utilização de Difusores em EPDM em detrimento dos tradicionais Difusores Cerâmicos;
- Ausência de equipamentos electromecânicos submersos, facilitando a identificação de potenciais anomalias e operações de manutenção preventiva e/ou correctiva.

Quadro 12 - Características do Sistema de Arejamento

Parâmetro	Unidade	Valor
Caudal de Ar de Projecto	m ³ /h	0,37
a'	Kg O ₂ /Kg CBO eliminado	0,55
b'	Kg O ₂ /Kg SVS dia	0,06

Filtração

Ao fim de aproximadamente 27 horas, o efluente passa em contínuo para o módulo de membranas, encontrando-se estas submersas no próprio efluente. As lamas retidas nas membranas são limpas por um sistema de limpeza automático com permeado em contra corrente, entrando em acção por perda de pressão ou por tempo. Para aumentar o tempo entre limpezas, é injectado ar por forma de difusores de bolhas, retirando parte das lamas retidas nas membranas. O permeado (efluente tratado) é conduzido para o meio receptor.

As membranas escolhidas para este projecto foram KOCH® do tipo PURON™ *Hollow Fiber Rows* PSH34, de Polietersulfona com poros de 0,05 µm. Foram

seleccionadas estas membranas, dado o seu design inovador permitir uma melhor remoção do *fouling* e uma menor acumulação de lamas na parte superior do módulo uma vez que a extremidade superior se encontra livre, promovendo um regime de turbulência superior que no caso de se encontrarem fixas (Figura 17). Uma das formas de diminuir a acumulação de lamas nestas membranas é a injeção de ar no centro do bloco de filamentos, provocando uma turbulência moderada entre os filamentos libertando, as lamas acumuladas na superfície das membranas. Estas membranas permitem ainda *backflush*, desbloqueando em contra corrente os poros, sendo resistentes a forças de pressão e tensão.

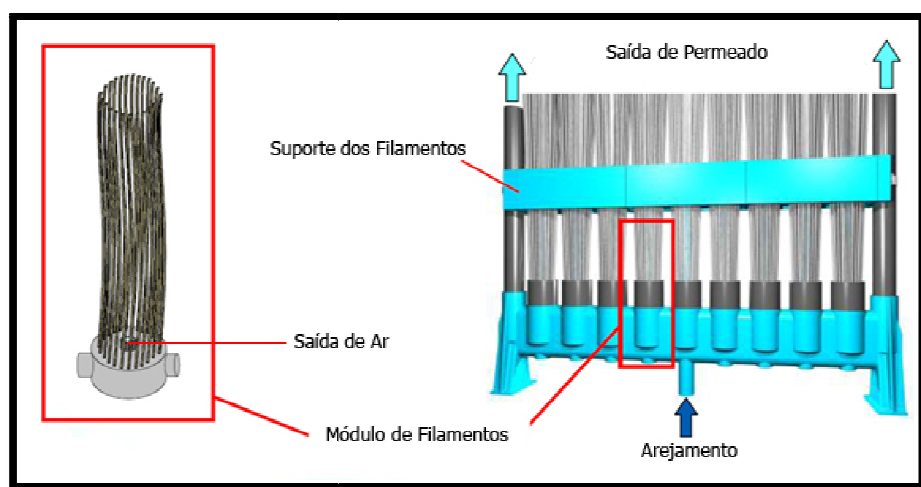


Figura 17 - Esquema de Funcionamento do Módulo de Membranas PURON™

Lamas em Excesso

As lamas em excesso são mantidas no reactor biológico removidas periodicamente e conduzidas a destino final adequado. A extracção de lamas poderá ser efectuada através de um camião cisterna com o auxílio de um tubo de aspiração que se deverá fazer passar no fundo do módulo de membranas.

O controlo analítico do efluente tratado será efectuado numa caixa de amostragem colocada a jusante do sistema de tratamento.

O esquema de tratamento encontra-se representado em anexo.

5.6. Dimensionamento Reactor MBR

5.6.1 Tanque de Equalização

Quadro 13 - Dimensões do Tanque de Equalização

Parâmetro	Unidade	Valor
Volume	m ³	3
Arejamento	m ³ /m ³ .min	0,01 a 0,015 (*)
Potência de Agitação	kW/m ³	0,004 a 0,008 (*)

(*) Valores adaptados de (Metcalf and Eddy, 2003)

Nesta zona existe uma ligeira remoção de matéria orgânica, no entanto é desprezada.

5.6.2 Tanque de Arejamento

Quadro 14 - Características e Dimensões do Reactor Biológico

Parâmetro	Unidade	Valor
Carga Mássica (F/M)	KgCBO5/Kg SSV.dia	0,03
Carga Volumica (fv)	KgCBO5/Kg m3.dia	0,45
Concentração de SSV	Kg SSV/m ³	7
MLSS	Kg MLSS/m ³	15,00
Volume	m ³	8,00

5.6.3 Membranas

Quadro 15 - Características do Módulo da Membranas

Parâmetro	Unidade	Valor
Tempo de Filtração	min	8
Tempo de Paragem	min	2
Arejamento	m ³ /m ² /h	220 ^(a)
Fluxo	L/m ² /h	7,35
Diâmetro dos Poros	µm	0,05
TMP máxima	bar	0,6 ^(*)
Área Total de Membranas	m ²	34 ^(*)
Caudal de Filtração	L/h	250

(*) Informação disponibilizada pela KOCH® mediante pedido de informação para projecto a realizar

(a) Retirado de (Fletcher et al., 2007)

Destes parâmetros, os tempos de filtração e paragem, o arejamento e a TMP são ajustados em início de exploração da estação, de forma a melhorar a eficiência do tratamento bem como de forma a permitir uma diminuição da acumulação de lamas nas membranas e assim aumentar a vida útil destas, evitando aumentos significativos no consumo de energia.

5.6.4 Produção de Lamas

A produção de lamas bem como a sua frequência de remoção será definida pela prática de exploração, sendo a purga efectuada através de um camião cisterna por um tubo de aspiração que se deverá passar pelo fundo da unidade de tratamento, como já referido.

Posteriormente as lamas são encaminhadas para tratamento específico, tal como: deposição em leitos de secagem; filtragem em filtro de prensa entre outros. Aquando da sua estabilização podem ser utilizadas como correctores

agrícolas, cumprindo o Decreto – Lei 446/91 de 22 de Novembro ou seguem para aterro sanitário após desidratação com a catalogação de resíduos banais segundo código LER 19 08 05.

5.7. Construção do Reservatório (Reactor)

O Reactor constituinte do sistema proposto é fabricado em Aço Carbono Tratado, o que se traduz numa elevada resistência mecânica e insensibilidade à corrosão.

5.7.1 Materiais

Os corpos e fundos do reservatório serão construídos em chapa de aço carbono S325JR/EN10025, ou equivalente.

5.7.2 Construção

Os reservatórios serão construídos com chapa de aço carbono S325JR/EN10025, ou qualidade equivalente, soldadas com material da mesma composição química.

As soldaduras serão executadas em máquina de soldadura por arco submerso (SAW), onde tal prática for possível. Nos locais de difícil acesso, as soldaduras são executadas a semi-automática ou a eléctrodo revestido apropriado.

5.7.3 Acabamentos

Superfícies Interiores

Decapagem ao *grau SA 21/2"* (SIS 055900). Duas demãos de epoxi de alcatrão, 300 µm de espessura em média ± 50 µm.

Superfícies Exteriores

Decapagem ao grau SA 21/2" (SIS 055900). Aplicação de uma camada de poliuretano (endoprene 868.06) composto por dois componentes com película adequada para resistir a uma passagem eléctrica de 2500 volts.

5.8. Equipamentos Electromecânicos

Quadro 16 - Equipamentos Electromecânicos

Equipamento	Unidade	Valor
Bomba TE-RB	kW	0,35
Soprador de Canal Lateral	kW	1,1
Bomba de Extracção de Permeado	Bar	0,6*
Bomba de <i>Backflush</i>	Bar	1 *

* Valores referidos pelo fornecedor

5.9. Quadro Eléctrico de Comando e Controlo (ETAR)

O Quadro Eléctrico de Comando e Controlo do sistema proposto deve ser capaz de permitir a completa automatização do sistema de tratamento, incluindo um PLC (*Programmable Logic Controller*) eficaz. Um sistema MBR completamente automatizado, simplifica todo o processo de operação e controlo, reduz a necessidade de trabalho manual e facilita os procedimentos de manutenção, reduzindo assim os custos de operação da estação (Company, 2008).

5.10. Manutenção

A simplicidade da unidade de tratamento, aliada ao seu funcionamento automático permite que a sua manutenção se restrinja a um conjunto de

operações de rotina cuja frequência será ditada pela prática normal de exploração.

Seguidamente apresentam-se a título indicativo os principais procedimentos de manutenção necessários e respectiva periodicidade de execução:

- Remoção dos gradados e deposição em contentor apropriado (Cód. LER 19 08 01);
- Inspeção e manutenção preventiva do equipamento electromecânico instalado (ver os manuais específicos dos equipamentos):
- Bomba de Extracção de Permeado;
- Soprador;
- Remoção das lamas em excesso depositadas e transporte a destino final adequado (Cód. LER 19 08 05);
- Verificação do estado das membranas: necessidade de limpeza física ou química, ditado pela prática de exploração;
- Vistoria do quadro eléctrico: de cada vez que se visita a ETAR;
- Vistoria a tubagens e controlo de fugas: de cada vez que se visita a ETAR.

5.11. Instalação do Sistema de Tratamento

Apresentam-se de forma geral as instruções relativas aos trabalhos de Construção Civil a efectuar relativamente à instalação do sistema de tratamento proposto.

5.11.1 Equipamento Electromecânico (ETAR)

- O electrosoprador de canal lateral deve ser instalado a uma distância máxima de 10 m do Reactor Biológico;
- A instalação do electrosoprador de canal lateral deve ser efectuada num local seco, protegido de pó de modo a evitar a rápida colmatção do filtro de ar. O local de instalação deve ser ventilado de modo a permitir uma eficiente recirculação de ar e evitar sobreaquecimentos;
- Deve ser instalada e regulada a válvula de alívio e o manómetro (nos modelos aplicáveis). A regulação da válvula de alívio é efectuada pelos técnicos durante o processo de arranque;
- Evitar estrangulamentos e consequentes perdas de carga e sobreaquecimentos: devem ser evitadas curvas a 90º na tubagem; sempre que tal não se possa evitar, devem utilizar-se curvas de raio longo e nunca joelhos.
- O material aconselhado para a tubagem de ar comprimido é o PEAD (PN 10 kg/cm²), ideal pela sua resistência química, maleabilidade e facilidade em dispor de acessórios; também pode ser utilizada tubagem em aço galvanizado ou inox;
- O ajuste do temporizador integrado no quadro é efectuado pelos técnicos durante o processo de arranque;
- Anexo à ETAR deverá ser construído um edifício de apoio com as dimensões suficientes para a instalação do quadro eléctrico e do compressor; este edifício deverá ser devidamente ventilado de modo a não provocar sobreaquecimento do compressor; deverá ser localizado o mais próximo possível da ETAR, para que os cabos de alimentação da bomba e

a tubagem de insuflação de ar sejam o mais curto possível, evitando custos e perdas de carga desnecessárias.

- Deverão ser seguidas todas as indicações específicas efectuadas pelo fabricante dos equipamentos electromecânicos (analisar os manuais que seguem junto aos equipamentos);
- Recomenda-se que a instalação seja efectuada por pessoal qualificado.

5.12. Equipamentos OPCIONAIS

5.12.1 Caudalímetro Electromagnético DN40

As características técnicas do caudalímetro electromagnético são as seguintes:

- Revestimento interno: polipropileno
- Material dos eléctrodos: AISI 316
- Ligações: tipo “wafer”
- Protecção: IP65
- Conversor incorporado, servido por microprocessador
- Indicação digital
- Totalização: em unidades de engenharia
- Saída: 4-20 mA impulsos e alarme (ou outra programável)
- Alimentação: 90-265V/45-66 Hz
- Precisão: 0,8 %
- Temperatura máxima: 60°C (PP); 100°C (PTFE); 80°C (Ebonite)
- Condutividade mínima: 5 µm/cm

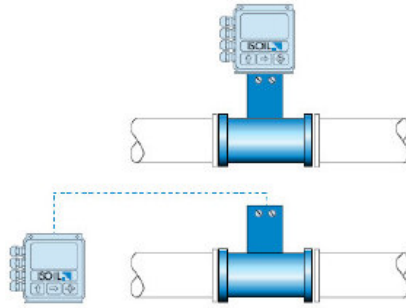


Figura 18 - Caudalímetro Electromagnético DN40

5.12.2 Sistema de desinfecção

Função

A desinfecção é uma operação utilizada no tratamento de água para destruir ou dificultar o desenvolvimento de microrganismos. O sistema de desinfecção é constituído por um sistema de controlo e regulação de cloro livre:

- Uma bomba de dosagem electromagnética com sensor de nível;
- Um sensor de nível (alarme de fim de produto);
- Reservatório de 100 litros;
- Reservatório de contacto.

Painel de Regulação de cloro

- Gama de medição 0-3 ppmCl;
- Temperatura de serviço: 0°C a 45°C;
- Alimentação eléctrica: 220V;
- Painel regulador com medidor CONTROLLER-5/Cl montado em painel PE-HD, incluindo todos os acessórios necessários segundo a configuração para o seu correcto funcionamento como: filtro de protecção; sonda; porta-sondas; válvulas de ajuste de caudal; tubagens de alimentação hidráulica; electroválvula (modelo purga automática); válvula de amostras, etc;

- Contactos ON-OFF de manobra livres de tensão;
- Protecção IP-65.

Bomba doseadora electromagnética com sensor de nível

- Bomba doseadora de diafragma directo;
- Cabeça da bomba em Polipropileno;
- Sede das válvulas em PVC; Membrana em PTFE/NBR; Válvulas (esferas) em PYREX;
- Equipados com válvulas de aspiração e compressão, kit de aspiração (1.5 m de tubo e válvula de pé) e tubo de injeção (1.5 m)
- Sensor de nível
- Caudais: 8 l/h
- Pressão máxima: 2 bar
- Tensão: 220 v

Depósito Doseador

Quadro 17 - Dimensões Depósito Doseador

Volume (L)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Diâmetro da Tampa (mm)
100	500	730	125

Reservatório de Contacto

É necessário assegurar um tempo mínimo de contacto de cerca de 30 minutos entre a água a tratar e o desinfectante para garantir o tratamento da mesma. Este reservatório vai servir não só para assegurar o tempo de contacto entre a água e o desinfectante como também permite o armazenamento da mesma

após desinfecção. Fabricado em polietileno linear aditivado anti-UV, por sistema de roto modelagem, o que se traduz em elevada resistência mecânica e insensibilidade à corrosão.

5.12.3 Desinfecção UV

O sistema de Ultravioletas apresenta as seguintes características técnicas:

- Caudal: 6m³/h;
- Factor de transmissão: 0,6 / 10;
- Irradiação garantida: > 50.000 µW/cm²/s;
- Temperatura do fluido: + 2º C/ + 40º C,
- Sólidos em suspensão: < 20 mg/l;
- Material: Aço Inox AISI 304;
- Pressão Hidráulica: Teste 12 Bar; Operação 8 Bar;
- Grau de Protecção: IP 55;
- Período de vida das Lâmpadas: 8.000 – 12.000 Horas;
- Protecção das Lâmpadas: Tubos ultrapuros de Quartzo;
- Sistema de Limpeza: Sistema Manual.
- Número de Lâmpadas: 6
- Ligações Hidráulicas (ND/NP): 80/16;
- A (mm): 398;
- B (mm): 650;
- Peso/Volume (Kg/Lt): 54/30.

O Sistema de Ultravioletas inclui:

- Sistema de U.V, com sistema de limpeza manual das lâmpadas;
- Controlador de U.V.

6. Análise Comparativa e Vantagens de um MBR

Neste capítulo tem-se como objectivo comparar sumariamente em várias vertentes (espaço; funcionalidades; custos; aumento de capacidades; arranque e produção de lamas) um sistema MBR, compacto ou não, com outras soluções de tratamento. Serão também definidos vários factores que permitam uma comparação entre os diferentes sistemas de tratamento e atribuída uma classificação qualitativa de modo a permitir, no final deste capítulo, não só uma melhor percepção sobre as características (vantagens e desvantagens) de um sistema MBR em relação a outros, como também a identificação de linhas de estudo, pesquisa e desenvolvimento que conduzam a uma diminuição dos seus custos, sem diminuição e se possível com o aumento das suas funcionalidades.

6.1. MBR vs SBR – Espaço, Funcionalidades e Custos

Um sistema SBR é um sistema de lamas activadas onde o arejamento e a decantação são efectuados no mesmo reactor, com cinco fases distintas: enchimento; arejamento; decantação; remoção do clarificado; remoção de lamas. O tempo médio de cada ciclo é de 1,6 horas distribuídos aproximadamente da seguinte forma: 25 minutos de enchimento, 35 de arejamento, 20 de decantação, 15 para remoção do clarificado e 5 para remoção de lamas. De forma a ser possível uma alimentação contínua do sistema é necessária a instalação de pelo menos dois SBR, para que enquanto um é alimentado o outro complete um ciclo de tratamento (Metcalf and Eddy, 2003). No entanto, com este tratamento, as características do efluente final não são iguais aos conseguidos com um MBR pelo que, se for este o objectivo, será necessário acrescentar uma fase de filtração terciária o que faz com que o espaço necessário para a instalação da estação de tratamento seja significativamente superior à necessária num MBR.

Nos sistemas SBR o pré-tratamento é efectuado por uma gradagem simples de 5 mm, sendo este menos dispendioso que uma tamisação de 1 a 3 mm necessária num MBR devido á acumulação de material nas membranas. A figura 20 representa os dois sistemas de tratamento onde RB significa Reactor Biológico, DS Decantador Secundário, F Filtro e M Membranas.

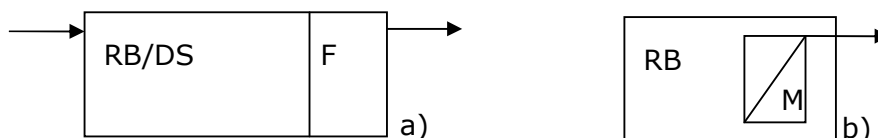


Figura 19 – Esquemas dos sistemas de tratamento: a) SBR; b) MBR

Como se pode observar pela figura 19, em termos de área ocupada, um sistema do tipo MBR ocupa menos espaço que um sistema SBR, sendo isto devido ao facto de num MBR, os sólidos suspensos podem atingir valores na ordem dos 20 g/L, enquanto SBR está limitado ao intervalo de baixa carga, sendo este de 4 a 8 g/L. Assim é possível num MBR, mesmo com tempos de retenção superiores, uma diminuição do volume do tanque. A título indicativo, para 50 h.e. um SBR necessita de um tanque com 15 m³ e um MBR ocupa 11 m³.

Quanto à qualidade do efluente final de cada um destes sistemas, esta é bastante diferente. Estas diferenças encontram-se no quadro 18 (Raina, 2007, EPA, 1999).

Quadro 18 - Performance dos sistemas SBR e MBR

Parâmetros	Unidades	SBR	MBR
CBO ₅	mg/L	10	2 a 5
SST	mg/L	10 a 20	0
N _{tot}	mg/L	5 a 8	< 2
P _{tot}	mg/L	1 a 2	< 1
Turbidez	NTU		< 0,2

Como pode ser observado no quadro anterior, estas diferenças são significativas, tanto a nível do tratamento biológico como físico, sendo a principal diferença nos sólidos suspensos totais. Para que um tratamento com um sistema SBR consiga diminuir a concentração de SST, é necessária uma filtração terciária que pode ser conseguida com vários tipos de filtro como um filtro de areia rápido ou um filtro multimédia sintético, entre outros. Com esta fase de filtração, é possível atingir concentrações de SST na ordem dos 5 mg/L, o que é uma melhoria significativa, no entanto insuficiente para igualar a de um MBR (Corporation, 2005).

Em relação aos custos, apresentam-se nos quadros 19 e 20 os custos aproximados dos sistemas, SBR e MBR na versão compacta, ambos dimensionados para 50 habitantes equivalente. O MBR representado nestes custos é o dimensionado no ponto 5.

Quadro 19 - Custeio SBR 50 h.e.

SBR50			
Descrição	Unidades	Preço Unitário	Preço
Gradagem 5mm	1	2.051,00 €	2.051,00 €
Reservatório Aço/Carbono 15m3	1	5.300,00 €	5.300,00 €
Soprador	1	747,00 €	747,00 €
Respiro DN 110	1	14,18 €	14,18 €
Válvula soprador	1	96,00 €	96,00 €
Quadro eléctrico	1	320,00 €	320,00 €
Difusores	9	18,50 €	166,50 €
Tubo PEAD 200	2	7,64 €	4,58 €
Filtro de Areia	1	2.056,00 €	2.056,00 €
TOTAL		10.755,26 €	

Quadro 20 - Custeio MBR 50 h.e.

MBR			
Descrição	Unidades	Preço Unitário	Preço
Tamizador (3 mm)	1	3.000,00 €	3.000,00 €
Reservatório Aço/Carbono 11 m3	1	4.730,00 €	4.730,00 €
Membranas PURON ® PSH34	1	3.000,00 €	3.000,00 €
Acessório de Elevação	1	236,56 €	236,56 €
Quadro eléctrico	1	900,00 €	900,00 €
Difusores	7	18,50 €	129,50 €
Soprador	1	747,00 €	747,00 €
Bomba de extracção permeado	1	1.000,00 €	1.000,00 €
Bomba de Backflush	1	1.000,00 €	1.000,00 €
Respiro DN 110	2	14,18 €	28,36 €
Bomba equalização	1	300,00 €	300,00 €
TOTAL		15.071,42 €	

Como se pode observar, o custo de um MBR é superior ao outro sistema de tratamento. Tal facto deve-se essencialmente ao custo do módulo de membranas, do pré-tratamento ser mais exigente e aos sistemas de bombagem (permeado e *backflush*), no entanto o preço do reservatório é inferior devido á diferença de volumes.

Para melhor compreensão dos requisitos de pré-tratamento e selecção de membranas num MBR e o seu reflexo no funcionamento e tempo de vida das próprias membranas, interligado com a sua relação de custos, será oportuno agora introduzir os conceitos de Capex e Opex, o que é feito e explicado no ponto seguinte.

6.2. CAPEX e OPEX

Existem dois conceitos para poder comparar os custos entre vários equipamentos e tipos de membranas, sendo este:

- **CAPEX** – é uma sigla derivada da expressão *Capital Expenditure*, que significa o capital utilizado para adquirir bens físicos, tais como equipamentos, propriedades e imóveis;

- **OPEX** – é uma sigla derivada da expressão *Operational Expenditure*, que significa o capital utilizado para manter ou melhorar os bens físicos, tais como equipamentos, propriedades e imóveis.

Estes dois conceitos estão interligados, na medida em que geralmente reduções no *CAPEX* são associados a um aumento do *OPEX* e vice-versa.

Aplicando estes conceitos a um MBR, o *OPEX* será o custo, em tempo de exploração, associado às membranas, reagentes de limpeza e energia. O *CAPEX* será tudo o resto. Assim é simples perceber a relação entre o custo inicial da estação de tratamento e o custo de operação, uma vez que também aqui, uma redução do *CAPEX* com a aquisição de um sistema de gradagem fraco e/ou membranas de características inadequadas, irá resultar num aumento do *OPEX*, ou seja, numa diminuição do tempo de vida das membranas e sua rápida substituição e um aumento na energia necessária e quantidade de reagentes de limpeza, devido à sua rápida colmatção (Fletcher *et al.*, 2007).

6.3. MBR vs CBCP – Espaço, Funcionalidades e Custos

Num trabalho desenvolvido por (Yoon *et al.*, 2004), comparou-se um sistema de tratamento químico e biológico combinado (CBCP) com um sistema MBR.

Neste estudo existe remoção de nutrientes, tanto no sistema combinado como no MBR. O sistema CBCP é, neste estudo, constituído por um tanque anóxico, um reactor aeróbio e um decantador secundário, seguido de um processo rápido de coagulação/floculação e decantação lamelar. O sistema MBR, neste estudo é constituído por um tanque anóxico, um tanque anaeróbico e um reactor biológico onde o módulo de membranas se encontra submerso. Os esquemas simplificados destes sistemas encontram-se representados na figura

20, onde An significa tanque anóxico, A aeróbio, DS Decantador Secundário, RB reactor biológico, M membranas, MR mistura rápida, ML mistura lenta e DL decantador lamelar.

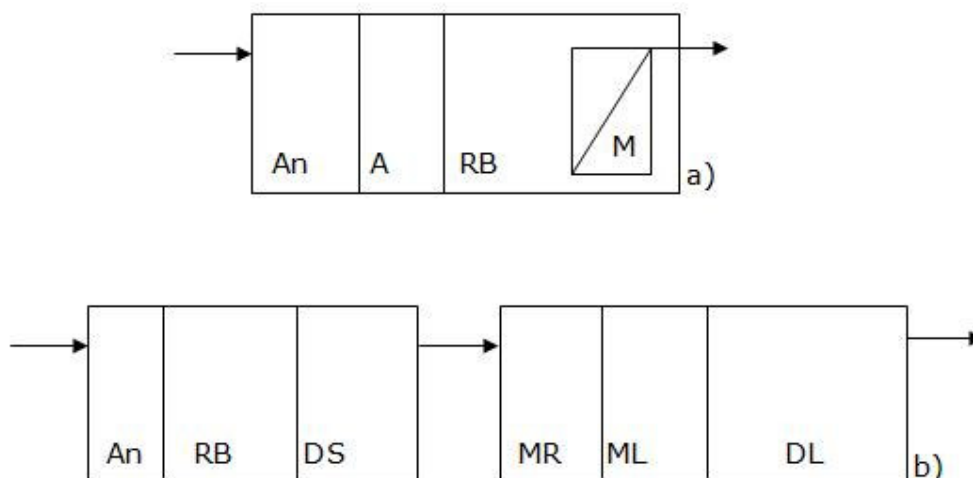


Figura 20 - Esquemas dos sistemas de tratamento a) MBR b) CBCP

Quanto às características do efluente final, estas encontram-se sumarizadas no quadro 21.

Quadro 21 - Performance dos sistemas CBCP e MBR (Yoon et al., 2004)

Parâmetros	Unidades	CBCP	MBR
CBO ₅	mg/L	0,15 a 2,1	0,3 a 2,8
CQO	mg/L	0,2 a 15,4	7,2 a 22,4
SST	mg/L	0,5 a 3,5	0,2 a 2,1
N _{tot}	mg/L	5,1 a 10,2	3,8 a 17,1
P _{tot}	mg/L	0,04 a 0,2	0,06 a 1,4

A performance dos dois sistemas é bastante eficaz sendo que neste caso para a maioria dos parâmetros, exceptuando SST, a performance do sistema CBCP é superior à de um MBR. Tal deve-se à adição de químicos coagulantes para remoção de matéria orgânica e de fósforo no sistema CBCP, o que melhora significativamente a performance do sistema, enquanto no MBR a remoção de poluentes é apenas biológica. Tal implica que o custo operacional de um MBR é

inferior a um CBCP, quer em relação a químicos (os de um MBR são de tal forma inferiores que podem ser ignorados), quer na energia requerida e produção de lamas. No entanto, a necessidade de substituição das membranas faz com que esta diferença seja anulada e até mesmo ultrapassada.

Neste caso, um sistema MBR requer ainda muito menos área de construção que um CBCP, sendo por isso o custo total da área significativamente inferior. No entanto o *CAPEX* das membranas supera esta diferença.

No final do estudo, verificou-se que o custo de um MBR é de mais €204/m³ que um CBCP em relação ao *CAPEX* e de mais €0,035/m³ que um CBCP em relação ao *OPEX*. De notar que o factor que levou a esta diferença é o custo directo da substituição de membranas.

6.4. Aumento de Capacidade - Natureza Modular e Expansibilidade

Uma aplicação rentável da filtragem por membranas, devido à natureza modular da maioria das opções comercializadas (geralmente em micro e ultrafiltração), faz com que o melhoramento ou ampliação de uma estação de tratamento seja relativamente simples, de forma a que seja possível expandir a capacidade de uma estação convencional quando esta atinge o seu caudal máximo. Uma destas vantagens é a pouca necessidade de construção civil, nomeadamente de novos tanques, reduzindo assim os custos de ampliação, sendo também possível aumentar a concentração de MLSS, reduzindo os custos de tratamento de lamas. Desta forma, futuras exigências em termos de caudal afluente são de fácil solução, sendo apenas necessário colocar mais módulos de membranas (Frederickson, 2005).

Esta expansibilidade, ou *upgrade*, de estações convencionais, segundo (Frechen *et al.*, 2006), será um dos maiores desafios e necessidades num futuro próximo. Com esse objectivo em vista, a utilização de MBRs é uma possibilidade que deve ser considerada, dada a não necessidade de construção de novos tanques uma vez que, caso os tanques aeróbios e os decantadores secundários se encontrem em bom estado, estes podem ser utilizados bastando apenas colocar os módulos de membranas submersos nos tanques já existentes, incluindo a passagem dos decantadores secundários a reactores biológicos. Este autor acrescenta ainda que, de facto, o custo de construção e operação de uma nova estação de tratamento por membranas é bastante superior ao de uma convencional, no entanto, no caso de expansão ou *upgrade* tal já não se verifica, sendo mais económico o aproveitamento das instalações existentes e a colocação de módulos de membranas que a construção de novos tanques.

6.5. Fase de Arranque e Produção de Lamas

Depois de terminado um *upgrade* da estação, ou na construção de uma nova, a fase de arranque desta, no caso de um sistema de tratamento convencional, a separação da biomassa é efectuada por efeito da gravidade, o que implica uma boa formação do floco biológico. Uma vez que a sedimentabilidade dos flocos biológicos é relativamente fraca com elevadas concentrações de MLSS, esta encontra-se limitada a cerca de 5 mg/L em sistemas convencionais, necessitando de decantadores secundários de grande superfície. Para além destes aspectos, sistemas de tratamento convencionais produzem quantidades significativas de lamas principalmente devido ao curto período de SRT (5 a 15 dias) fazendo com que o seu tratamento corresponda a 50-60% do custo total operação.

Num sistema MBR as condições de arranque e produção de lamas são bastante diferentes. Uma vez que não há processo de decantação, não é

necessária a formação de um floco estável podendo aumentar-se a concentração de MLSS até 30 mg/L, o que permite um processo de arranque mais simples atingindo rapidamente a qualidade desejada no efluente final. Sendo que num sistema MBR não existe decantação secundária, podem ser utilizados SRT mais elevados, o que permite uma redução significativa na produção de lamas e longos períodos sem necessidade de remoção destas, podendo ultrapassar em sistemas aeróbios os 200 dias e em sistemas anaeróbios 3500 dias (Sun et al., 2006).

6.6. Vantagens de um MBR

Resumidamente e como detalhado ao longo do documento, é possível identificar as seguintes vantagens de um sistema MBR comparativamente a outros sistemas:

Menor espaço necessário – Benefícios de poupança de área ocupada, limitações arquitectónicas, ou outras;

Qualidade do efluente final – Possibilita “naturalmente” uma boa qualidade do efluente final sem a necessidade de um processo de filtração adicional (SBR) nem introdução de químicos no tratamento (CBCP) – mais uma vez reduzindo necessidades de espaço e equipamento ou de utilização de químicos e respectivos custos;

Upgrade de estações convencionais - Solução de boa qualidade e economicamente vantajosa para aumento de capacidade de estações convencionais;

Inicialização mais simples e rápida – Melhor tempo de resposta em fase de arranque comparativamente ao restantes sistemas devido à fase de filtração que é sempre garantida;

Produção de menor quantidade de lamas – Aumentando a idade de lamas diminui-se a sua produção, reduzindo a necessidade de recolha, tratamento e transporte com todas as poupanças a estas associadas.

7. Conclusões

A tendência actual é para um aumento de instalações MBR, nomeadamente devido às exigências na qualidade do efluente e ao aumento da procura de água. Hoje em dia, qualquer projecto que tenha em vista a utilização de um MBR, incorpora uma variedade de factores como a reduzida área de implementação acoplado com a necessidade de uma água tratada de alta qualidade, passível de ser reutilizada. No entanto, dado o seu custo ser significativamente superior, a obrigatoriedade de escolha de um MBR será decorrente do imperativo na adopção das suas qualidades mais vantajosas, como locais onde as condicionantes de espaço disponível, quer pelo seu preço, quer por imposições de natureza arquitectónica ou simplesmente pela sua inexistência, implicam a instalação de um sistema compacto, combinado com o facto de as exigências de qualidade no efluente final serem tais que não se consigam obter em sistemas alternativos, mais convencionais. De qualquer forma, os sistemas MBR oferecem vários benefícios quando comparados com sistemas mais convencionais, incluindo: menor requerimento de área, melhor remoção de sólidos, vírus e bactérias e menor produção de lamas.

Quanto ao dimensionamento de um sistema MBR compacto, este pode ser produzido com um custo capital dentro dos limites comerciais para outras soluções compactas, no entanto o seu valor encontra-se no limite superior. Esta razão, como referido várias vezes ao longo desta dissertação, deve-se ao facto de as membranas terem a “reputação” de aumentar significativamente o *CAPEX* de qualquer projecto de tratamento de águas residuais. Este facto pode ser ainda atribuído à falta de concorrência no mercado das membranas, que apesar de estar em crescimento é ainda pequeno, existindo poucas marcas de referência. Em relação aos custos de operação, pode concluir-se que o *OPEX* de um sistema destes é considerado elevado, não só pelo consumo energético ser superior a

tratamentos convencionais, mas principalmente devido ao custo de substituição do módulo das membranas que têm um tempo de vida útil curto.

Um ponto que é importante focar, é mais uma vez o *fouling* das membranas, e o facto de o seu entendimento ser crucial para uma operação correcta de um MBR, não havendo ainda no entanto, um entendimento na comunidade científica quanto ao principal agente responsável por este fenómeno. Este entendimento, é necessário de forma a aumentar o máximo possível o tempo de vida das membranas, normalmente com uma limpeza física constante, seja por arejamento, *backflush* ou relaxamento, a remoção do *fouling* apenas é possível com uma aplicação periódica de uma limpeza química.

Outra conclusão que se pode tirar, é que a qualidade do efluente de um sistema MBR excede a qualidade de um sistema de tratamento convencional, o que torna o efluente adequado para fins mais exigentes como para uma osmose inversa, servindo assim um MBR como pré-tratamento a sistemas de tratamento mais exigentes.

No entanto, a aplicação de MBR provou ter ainda de superar vários desafios, nomeadamente a perda das características da membrana durante a operação do sistema de tratamento o que leva ao decréscimo da qualidade do efluente e ao consequente aumento do consumo de energia. Contudo, num futuro próximo, sistemas MBR serão economicamente competitivos comparativamente com tecnologias convencionais, considerando uma tendência para a redução do custo de produção, venda e aumento do tempo de vida útil das membranas.

Finalmente, pode afirmar-se que o mercado de MBR compactos é significativamente influenciado pelo potencial de reutilização do efluente produzido. São no entanto ainda necessários mais estudos no sentido de

melhorar o custo que esta tecnologia implica sem descurar na qualidade que oferece. Assim, o sucesso na obtenção de resultados nesta área conduzirá naturalmente ao aumento da possibilidade de utilização desta tecnologia, tornando-se assim um interessante nicho de mercado.

8. Perspectivas para Estudos Futuros

Para um controlo mais eficiente do funcionamento de um sistema MBR, é fundamental perceber os mecanismos de *fouling* das membranas, responsáveis pela degradação da qualidade do efluente, pelo aumento do consumo de energia ao longo do tempo e principalmente pela diminuição do tempo de vida das membranas. Assim, neste capítulo é importante referir que muito ainda há por fazer quanto ao entendimento do *fouling*. Existe principalmente a necessidade de definir condições e métodos por forma a perceber qual é de facto o efeito dos EPS e SMP nas membranas. É também uma necessidade a monitorização a longo prazo da permeabilidade das membranas de forma a identificar e definir parâmetros que tornem possível prevenir o bloqueio e a colmatção destas. Este conhecimento é de extrema importância para MBR *full-scale* e MBR compactos de modo a permitir o ajuste de agentes precipitantes/coagulantes, ou outros, e um método de limpeza mais eficaz, fazendo com que a estação funcione cada vez mais de uma forma técnico-económica, devendo isto ser possível com ensaios à escala piloto com módulos utilizados à escala industrial.

Tendo como adquiridas as vantagens de um MBR, redução do espaço ocupado e qualidade do efluente final, o factor que mais pesa em desfavor deste sistema é o custo das membranas, pelo que seria de elevado interesse desenvolver um estudo do seu processo produtivo, com o objectivo de conseguir a sua comercialização com custos mais reduzidos mantendo ou até aumentando as suas características funcionais.

Relativamente ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, encontra-se neste momento em desenvolvimento, conjuntamente com a ECODEPUR® - Tecnologias de Protecção Ambiental, um sistema MBR Compacto com remoção biológica de azoto, de forma a cumprir o objectivo de reutilização da água

residual para fins não potáveis em zonas sensíveis. Também como consequência desta dissertação encontra-se em desenvolvimento um novo sistema de módulos de membranas do tipo HF com um sistema de limpeza eficaz e baixo custo de produção.

Com a combinação destes dois desenvolvimentos, será possível a construção de um sistema MBR compacto, com elevada qualidade do efluente final, remoção de nutrientes e facilidade de limpeza das membranas o que aumenta o seu tempo de vida e consequentemente a diminuição dos custos de todo o sistema (TCO mais baixo). Assim, e de modo a aumentar a sua possibilidade concorrencial, é na problemática das membranas que deverá incidir uma observação e um estudo mais aprofundado.

Glossário

Aeróbio – Condições onde o oxigénio actua como dador de electrões para reacções bioquímicas.

Backflush – Inversão do fluxo através das membranas para remoção de agentes bloqueantes.

Biofilme – Camada de matéria biológica.

Biomassa – Microrganismos vivos utilizados para remoção de constituintes orgânicos em tratamento biológico.

Bloqueio Irrecuperável / Absoluto – Bloqueio que não é removido com nenhum tipo de limpeza física ou química.

Bloqueio Irreversível / Permanente – Bloqueio removido por limpeza química.

Bloqueio Reversível / Temporário – Acumulação de sólidos grosseiros na superfície das membranas, removidos com facilidade.

Bolo – Matéria sólida formada na membrana durante a operação de filtração.

Colmatação – Acumulação de sólidos nos poros das membranas.

F/M – Relação alimento-microrganismos, taxa em que o substrato é comparado com a quantidade de biomassa sólida.

Filamento – Unidade de uma membrana do tipo Fibra Oca ou Tubo Capilar.

Floco – Agregado sólido de partículas (biomassa).

Fluxo – Caudal que passa de uma unidade de área de membrana.

Fluxo crítico – Fluxo abaixo do qual não ocorre colmatação/bloqueio das membranas.

Fluxo sustentável – Fluxo ao qual a TMP aumenta gradualmente a uma taxa aceitável de tal forma que a limpeza química não é necessária.

Fouling – Processo que leva á diminuição do fluxo devido ao bloqueio ou colmatção das membranas.

Gel – Precipitado de espécies macro moleculares solúveis na superfície das membranas.

Hidrófilico – Superfície com afinidade á água.

Hidrofóbico – Superfície que repela a água.

Limpeza de recuperação química – Limpeza com químicos agressivos para recuperação da permeabilidade das membranas.

Permeabilidade – Facilidade de atravessamento da membrana. É representado pelo fluxo.

Permeado – Água ou fluido que atravessa a membrana.

Relaxamento – Paragem de filtração mantendo-se a injeccção de ar para limpeza das membranas.

Sobrenadante – Liquido clarificado por sedimentação.

TMP Jump – Aumento súbdito da TMP em condições específicas.

Tratamento biológico – Processo onde os constituintes químicos e orgânicos são removidos através de biodegradação.

Referências

Decreto-Lei 152/97. *O presente diploma aplicam-se à recolha, tratamento e descarga de águas residuais urbanas no meio aquático, procedendo à transposição para o direito interno da Directiva nº 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio de 1991. DIÁRIO DA REPÚBLICA nº 139 I SÉRIE-A.*

Decreto-Lei 236/98. *Estabelece normas, critérios e objectivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. DIÁRIO DA REPÚBLICA nº 176 I SÉRIE-A.*

Decreto-Lei 446/91. *O presente diploma transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho, relativa à utilização das lamas de depuração na agricultura, por forma a evitar efeitos nocivos no homem, na água, nos solos, na vegetação e nos animais, promovendo a sua correcta utilização. DIÁRIO DA REPÚBLICA nº 269 I SÉRIE-A*

Lei 58/2005. *Transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, e estabelecendo as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas. DIÁRIO DA REPÚBLICA nº 249 I SÉRIE-A*

LISTA EUROPEIA DE RESÍDUOS. CÓDIGO LER.

AL-HALBOUNI, D., TRABER, J., LYKO, S., WINTGENS, T., MELIN, T., TACKE, D., JANOT, A., DOTT, W. & HOLLENDER, J. (2008) Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena. *Water Research*, 42, 1475-1488.

BAKER, R. W. (2004) *Membrane Technology and Applications*, Wiley.

CATARINO, A. I. S. (2000) Remoção e Concentração de Microalgas por Ultra/Microfiltração Tangencial. *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente*. Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.

CHANG, I. S. & JUDD, S. J. (2002) Air sparging of a submerged MBR for municipal wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 37, 915-920.

CHANG, I. S., LE CLECH, P., JEFFERSON, B. & JUDD, S. (2002) Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 128, 1018-1029.

- CHEN, J. P., KIM, S. L. & TING, Y. (2003) Optimization of membrane physical and chemical cleaning by a statistically designed approach. *Journal of Membrane Science*, 219, 27-45.
- CHOI, H., ZHANG, K., DIONYSIOU, D. D., OERTHER, D. B. & SORIAL, G. A. (2005) Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 45, 68-78.
- COMPANY, G. E. (2008) 12 Golden Rules to Maximize MBR Value. Disponivel em http://www.gewater.com/products/equipment/mf_uf_mbr/mbr/design_considerations.jsp [Agosto 2008].
- CORPORATION, Q. E. (2005) Civic Center Integrated Water Quality Management Feasibility Study City of Malibu, California.
- DREWS, A., MANTE, J., IVERSEN, V., VOCKS, M., LESJEAN, B. & KRAUME, M. (2007) Impact of ambient conditions on SMP elimination and rejection in MBRs. *Water Research*, 41, 3850-3858.
- EPA (1999) *Wastewater Technology Fact Sheet, Sequencing Batch Reactors*, Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency.
- FLETCHER, H., MACKLEY, T. & JUDD, S. (2007) The cost of a package plant membrane bioreactor. *Water Research*.
- FRAVAL, S. (2005) Choosing between Bioreactors with Immersed or Non-Immersed Membranes. ORELIS.
- FRECHEN, F. B., SCHIER, W., WETT, M. & WALDHOFF, A. (2006) Upgrading of existing municipal wastewater treatment plants with the "non-conventional low MLSS MBR technology". *Engineering in Life Sciences*, 6, 68-73.
- FREDERICKSON, K. C. (2005) The Application of a Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment on a Northern Manitoban Aboriginal Community. *Department of Biosystems Engineering*. Winnipeg, Manitoba, Canada, University of Manitoba.
- GUGLIELMI, G., CHIARANI, D., ANDREOTTOLA, G. & ZIGLIO, G. (2007) Membrane bioreactor technology for agricultural reuse of municipal wastewater: a comparative study. *2nd IWA National Young Water Professionals Conference, Membrane Technologies for Wastewater Treatment and Reuse*. Berlin, Germany, KompetenzZentrum Wasser Berlin.

- GUO, W. S., VIGNESWARAN, S., NGO, H. H. & CHAPMAN, H. (2004) Experimental investigation of adsorption-flocculation-microfiltration hybrid system in wastewater reuse. *Journal of Membrane Science*, 242, 27-35.
- HO, W. S. W. & SIRKAR, K. K. (1992) *Membrane Handbook*, New York, Van Nostrand Reinhold.
- IGB, F. (1997) A filter for fresh air and drinking water. Disponível em http://www.igb.fraunhofer.de/WWW/Presse/Jahr/1997/en/PI_Membrane-contactactor.en.html [Agosto 2008].
- JUDD, S. (2006) *The MBR Book*, Elsevier.
- KIM, J. S., LEE, C. H. & CHUN, H. D. (1998) Comparison of ultrafiltration characteristics between activated sludge and BAC sludge. *Water Research*, 32, 3443-3451.
- KOCH (2008) Tubular Membranes Overview. Disponível em http://www.kochmembrane.com/prod_tubular.html [Agosto 2008]
- MADAENI, S. S., FANE, A. G. & WILEY, D. E. (1999) Factors influencing critical flux in membrane filtration of activated sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*.
- MARTINS, A., FREIRE, J., SOUSA, J. D. & RIBEIRO, A. (2006) Potencialidades de reutilização de águas residuais para rega de campos de golfe na região do Algarve. Faro, Águas do Algarve.
- METCALF & EDDY (2003) *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, McGraw Hill.
- MULDER, M. (1991) *Basic Principles of Membrane Technology*, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- MUNIR CHERYAN, P. D. (1986) *Ultrafiltration Handbook*, Lancaster, Pennsylvania, Technomic Publishing CO.
- NADIR, M. BIO-CEL® Submerged modules for membrane bioreactors.
- NUENGJAMNONG, C. (2006) THE INVESTIGATION OF SOLUBLE MICROBIAL PRODUCTS IN MEMBRANE FOULING. *Department of Animal Husbandry*. Bangkok, Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University.

- PORTUGAL, Á. D. (2002) SOLUÇÕES TIPO PARA PEQUENAS INSTALAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS. Lisboa, Águas de Portugal.
- RAINA, D. (2007) Technological Advancement of SMBR – The Submerged PURON® System. Bahrain.
- RAMESH, A., LEE, D. J., WANG, M. L., HSU, J. P., JUANG, R. S., HWANG, K. J., LIU, J. C. & TSENG, S. J. (2006) Biofouling in membrane bioreactor. *Separation Science and Technology*, 41, 1345-1370.
- ROEST, H. F. V. D., LAWRENCE, D. P. & BENTEM, A. G. N. V. (2002) *Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment*, the Netherlands, IWA Publishing.
- ROSENBERGER, S., EVENBLIJ, H., POELE, S. T., WINTGENS, T. & LAABS, C. (2005) The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes - six case studies of different European research groups. *Journal of Membrane Science*, 263, 113-126.
- STOPKA, J., SCHLOSSER, Š., DÖMÉNY, Z. & ŠMOGROVIČOV, D. (2000) Flux Decline in Microfiltration of Beer and Related Solutions of Model Foulants through Ceramic Membranes. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 9.
- SUN, D. D., HAY, C. T. & KHOR, S. L. (2006) Effects of hydraulic retention time on behavior of start-up submerged membrane bioreactor with prolonged sludge retention time. *Desalination*, 195, 209-225.
- TEIXEIRA, M. M. D. C. G. R. (2001) Ultrafiltração no Tratamento de Águas para Consumo Humano. *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente*. Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.
- WANG, X. M., LI, X. Y. & HUANG, X. (2007) Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (SMBR): Characterisation of the sludge cake and its high filtration resistance. *Separation and Purification Technology*, 52, 439-445.
- XING, C. H., WEN, X. H., QIAN, Y., WU, W. Z. & KLOSE, P. S. (2003) Fouling and cleaning in an ultrafiltration membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Separation Science and Technology*, 38, 1773-1789.

- YOON, T. I., LEE, H. S. & KIM, C. G. (2004) Comparison of pilot scale performances between membrane bioreactor and hybrid conventional wastewater treatment systems. *Journal of Membrane Science*, 242, 5-12.
- ZHANG, J., CHUA, H. C., ZHOU, J. & FANE, A. G. (2006) Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 284, 54-66.

Anexo

